



Treball de fi de màster

Títol: Eficiencia energética y energías renovables en estaciones de esquí. Caso de estudio: Pirineos.

Cognoms: Pereiro Olaizola

Nom: Eduardo

Titulació: Màster en Ciència i Tecnologia de la Sostenibilitat

Director:

Oriol Travesset Baró (Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra)

Tutor UPC: Martí Rosas Casals (Sustainability Measurement and Modeling Lab, UPC)

Data de lectura: 24 de octubre de 2018

The universe is not required to be in perfect harmony with human ambition.

Carl Sagan

AGRADECIMIENTOS

Aprovechando un momento de reflexión sobre todo el esfuerzo realizado, he decidido dedicar unas líneas a aquellas personas que han hecho posible la realización de este Trabajo Final de Máster.

En primer lugar quiero agradecer la predisposición de Martí Rosas Casals, director de este trabajo. Su peculiar visión sobre la ciencia y la modelización de sistemas, y la forma en que lo transmitía, ha sido sin duda, una gran experiencia durante el Máster, que aumentó considerablemente mi interés en la modelización de sistemas. Además, cuando tuve la idea de llevar a cabo este proyecto, en colaboración con el Observatori Sostenibilitat d'Andorra, él me puso en contacto con el personal del OBSA. Por descontado, siempre se ha mostrado con ganas de ayudar, sobre todo, en los aspectos de burocracia de la universidad.

En segundo lugar, debo reconocer que sin Oriol Travesset, investigador del OBSA, no habría llegado a este punto puesto que seguramente no existiría un trabajo como éste. He de reconocer que ha sido la principal figura y guía durante estos meses. Su conocimiento en el campo de la sostenibilidad, ligado a la montaña, el esquí y la naturaleza ha sido clave en el desarrollo del trabajo. Gracias a su amabilidad, disponibilidad y buena actitud en todo momento, se ha podido lograr este resultado. Por otro lado, quiero dar las gracias a Marc Pons, Director del OBSA, porque a pesar de no haberlo conocido personalmente, sus estudios, publicaciones científicas y material compartido han sido clave para el éxito y resultado de este trabajo.

No menos importante ha sido la colaboración del departamento técnico de Baqueira Beret S.A. Especial reconocimiento merecen Alex Bares, Director Técnico y Jonatan López, Ingeniero del Departamento Técnico. Desde el primer día que contacté con Alex, se mostró predispuesto a ayudar y fue él quien me dijo que podía contactar con Jonatan para que me atendiese y me facilitase toda la información a su alcance. Sin los datos e información que compartieron conmigo, y me reitero, hubiera sido impensable la realización de este trabajo.

Esta toma de contacto con Alex se dio gracias a Eduardo Puente, un amigo del Valle de Arán que, después de haberle comentado la idea de proyecto que tenía, me sugirió que me pusiera en contacto con Alex y le comentase mi propósito.

Por último, quiero agradecer a todos mis seres queridos y cercanos. A la familia, ya que ellos han sido quienes me han motivado día a día, en los buenos y sobre todo, en los malos momentos. A mis amigos de la *Ikastola* por haberme aguantado y por esas cañas a última hora de la tarde, entre risas, después de largas jornadas encerrado y trabajando delante del ordenador.

A todos ellos, gracias.

Donostia, septiembre de 2018

RESUMEN

Por todos son conocidas las nefastas consecuencias que puede acarrear el cambio climático. El impacto negativo que tiene el calentamiento global puede afectar de infinitas maneras dependiendo de la sociedad, contexto y factores que inciden sobre una determinada actividad. El presente trabajo se centra en cómo puede afectar en la demanda energética de las estaciones de esquí y en analizar el potencial de medidas de eficiencia energética e introducción de energías renovables. Concretamente, este caso de estudio se centra en una estación de esquí en los Pirineos.

Para llevar a cabo esta tarea, se ha implementado un modelo de la estación de esquí de Baqueira Beret, entendiendo ésta como un sistema energético. Debido a la necesidad de caracterizar la demanda energética de forma desagregada y lo más precisa posible, se ha optado por el software LEAP (*Long-range Energy Alternatives Planning system*). Esta herramienta permite la modelización de sistemas energéticos a partir de asunciones simples y desagregadas. Además, usa datos detallados en combustibles y evalúa costes y beneficios de tecnologías y políticas individuales.

Para la modelización de la estación de esquí se han tenido en cuenta todos los consumos energéticos de los diversos equipos y las potencias instaladas de los mismos, además de una serie de asunciones clave o variables conductoras, que determinan los resultados finales obtenidos.

Se han identificado algunos aspectos que pueden influir en el consumo energético del sistema y se han contabilizado las emisiones asociadas a este consumo. Estos factores determinantes son: aumento en la temperatura de la superficie terrestre, incremento o decremento del número de esquiadores en la estación, la incorporación de medidas de eficiencia energética y la introducción de energías renovables, principalmente.

Finalmente, se han elaborado diferentes escenarios de futuro. Estos escenarios pretenden ser una descripción consistente de una situación futura guiada por los factores determinantes del sistema.

RESUM

Per tots són conegudes les nefastes conseqüències que pot comportar el canvi climàtic. L'impacte negatiu que té l'escalfament global pot afectar d'infinites maneres, depenent de la societat, context i factors que incideixen sobre una determinada activitat. El present treball tracta d'analitzar com aquest fenomen pot influir sobre els esports d'hivern que es practiquen en estacions d'esquí. Concretament, aquest cas d'estudi se centra en una estació d'esquí als Pirineus. Per dur a terme aquesta tasca, cal realitzar un model de l'estació d'esquí, entenent aquesta com un sistema energètic. A causa de la necessitat de caracteritzar la demanda energètica de forma desagregada i el més precisa possible, s'ha optat pel software LEAP. Aquest tipus de programari permet la modelització de sistemes energètics a partir d'assumpcions simples i desagregades. A més, fa servir dades detallades en combustibles i avalua costos i beneficis de tecnologies i polítiques individuals.

Per a una òptima modelització de l'estació d'esquí, cal tenir en compte tots els consums energètics dels diversos equips i les potències instal·lades dels mateixos, a més d'una sèrie d'assumpcions clau o variables conductores, que determinaran el resultat final. S'han identificat alguns aspectes que poden influir en el consum energètic del sistema, ja sigui augmentant-lo o disminuint-lo. A més, no cal oblidar la importància de comptabilitzar les emissions associades al consum energètic. Aquests factors determinants són: augment en la temperatura de la superfície terrestre, increment o decrement del nombre d'esquiadors a l'estació, la presa de mesures d'eficiència energètica i la introducció d'energies renovables, principalment.

Amb tot el citat en el paràgraf anterior, s'elaboraran diferents escenaris de futur, resultants de combinacions entre si. Aquests escenaris pretenen ser una descripció consistent d'una situació futura determinada pels factors més importants que s'han tingut en compte.

Finalment, es discutiran els resultats obtinguts i s'exposaran les conclusions extretes sobre la base del treball realitzat.

ABSTRACT

Everyone knows the disastrous consequences that climate change can bring. The negative impact of global warming can affect in infinite ways depending on the society, context and factors that affect a certain activity. The present work tries to analyse how this phenomenon can influence the winter sports practiced in ski resorts. Specifically, this case study focuses on a ski resort in the Pyrenees.

To carry out this task, it is necessary to make a model of the ski resort, understanding it as an energy system. Due to the need to characterize energy demand in a disaggregated way and as precisely as possible, we have opted for LEAP software. This type of software allows the modelling of energy systems based on simple and disaggregated assumptions. In addition, it uses detailed fuel data and evaluates the costs and benefits of individual technologies and policies. For an optimal modelling of the ski resort, it is necessary to take into account all the energy consumptions of the various equipment and the installed powers thereof, as well as a series of key assumptions or conductive variables, which will determine the final result. Some aspects have been identified that can influence the energy consumption of the system, either increasing or decreasing it. In addition, we must not forget the importance of accounting for emissions associated with energy consumption. These determining factors are: increase in the temperature of the earth's surface, increase or decrease in the number of skiers in the station, the taking of energy efficiency measures and the introduction of renewable energies, mainly. With everything mentioned in the previous paragraph, different future scenarios will be developed, resulting from combinations of each other. These scenarios are intended to be a consistent description of a future situation determined by the most important factors that have been taken into account.

Finally, the results obtained will be discussed and the conclusions drawn based on the work carried out.

Palabras clave

Ski Resort, Sustainability, Renewable Energy, Efficiency, Climate Change, System Modelling

Contenido

<i>Palabras clave</i>	vii
1. Antecedentes	9
1.1. El efecto del cambio climático en el turismo de nieve	11
1.2. La necesidad de una buena gestión energética	12
1.3. Modelos de planificación energética	12
1.4 El modelo de turismo de nieve de los Pirineos	15
2. Definición de objetivos	17
2.1. Objetivo general	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. Modelo de planificación energética LEAP-Baqueira.....	18
3.1. Caso de estudio	18
3.2. Elección y justificación del modelo	20
3.3. Descripción general del modelo	22
3.3.1. Contabilización de las emisiones	22
3.4. Hipótesis macroeconómicas	23
3.4.1. Clientes de la estación	23
3.4.2. Precio del petróleo.....	24
3.5. Modelización de la demanda energética	25
3.5.1. Remontes	25
3.5.2. Producción de nieve	26
3.5.3. Cafeterías.....	27
3.5.4. Aparcamiento Ruda.....	27
3.5.5. Resto.....	27
3.5.6. Instalaciones	27
3.5.7. Pistas	28
3.5.8. Vehículos.....	28
3.5.9. Validación con datos reales	30
3.6. Modelización del abastecimiento energético	31
3.6.1. Introducción	31
3.6.2. Energía eléctrica.....	32
3.7. Recursos energéticos	34
3.8. 300Escenarios considerados.....	34

3.8.1.	Producción de nieve	37
3.8.2.	Aumento de visitantes	46
3.8.3.	Medidas de eficiencia energética	48
3.8.4.	Introducción de energías renovables	54
3.8.5.	Costes y parámetros	65
4.	Resultados	67
4.1.	Escenario A (Referencia):	67
4.2.	Escenario B	70
4.3.	Escenario C	71
4.4.	Escenario D	73
4.5.	Escenario E.....	75
4.6.	Escenario F.....	77
4.7.	Escenario G	79
4.8.	Escenario H	81
4.9.	Todos los escenarios.....	83
5.	Discusión de resultados.....	85
5.1.	Eficiencia energética	85
5.2.	Potencial de generación solar fotovoltaica	85
5.3.	Potencial de generación eólica	86
5.4.	Contabilización de emisiones.....	87
6.	Conclusiones	88
6.1.	Factores clave.....	89
6.2.	Futuro del modelo LEAP-Baqueira.....	89
7.	Bibliografía	90

1. Antecedentes

El cambio climático es reconocido por la mayoría de los gobiernos y científicos de todo el mundo como un importante problema social y ambiental que enfrenta la población mundial y sus recursos. De acuerdo con el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2001), la temperatura media global en la superficie de la tierra ha aumentado $0,6 \pm 0,2$ °C desde 1861. Además, se espera un aumento de frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (inundaciones, sequías, olas de calor, nevadas copiosas, etc.) (Amelung et al. 2007).

Es importante analizar la relación existente entre el cambio climático y el turismo en estaciones de esquí y cómo afecta el aumento de temperatura. Debido al calentamiento global se están dando variaciones en las nevadas que se producen en la montaña, especialmente en estaciones de esquí. Es, por tanto, necesario estudiar las causas de este fenómeno y aportar soluciones que ayuden a mitigar estas consecuencias. La supervivencia de los servicios ecosistémicos que ofrecen los Pirineos depende del desarrollo e incorporación de recursos y prácticas sostenibles.

A día de hoy, existen estrategias para crear estaciones de esquí más respetuosas con el medio ambiente, que surgen de los intereses de grupos, asociaciones de turismo y organizaciones no gubernamentales. Ejemplo de ello son: NSAA (*National Ski Areas Association*) 2000; Pro Natura 2000, Colorado dept. of public health & environment & Tetra Tech 2002, BCHSSOA (*British Columbia Helicopter and Snowcat Skiing Operators Association*) 2003 o RMOW (*Resort Municipality of Whistler*) 2004 (Dickson and Dickson 2006).

Algunas estaciones de esquí están aumentando sus niveles de reciclaje, mientras que otras están trabajando para reducir su impacto sobre la naturaleza. Esto se traduce en prácticas *eco-friendly* y una conciencia sostenible de cómo usar los recursos naturales de manera eficiente y responsable (R. Hoyal 2013).

Aspen Skiing Company (Colorado, USA) fue una de las primeras estaciones en anunciar sus nuevas políticas para proteger el medioambiente. No sólo tuvieron en cuenta las pistas sino también la industria del turismo hibernal. Usan carburante biodiesel para las máquinas pisadoras y usan el cien por cien de energía eólica como fuente de recursos sostenible¹.

En Jackson Hole Mountain Resort (Wyoming, USA) buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la renovación de las instalaciones del complejo incluyendo el cien por cien de fuentes de energía renovables y reciclando un tercio de los residuos que genera. Esto hace que la estación quede fuera de la red y sea completamente autónoma en cuanto a demanda eléctrica².

Kaprun (Austria), lidera el camino en la consecución de ser la primera compañía con certificado ISO. Operan el remonte Kitzsteinhorn y mejoran la eficiencia, seguridad y calidad de la estación en su totalidad. Es más, el remonte está conectado a una tubería de aguas residuales que extrae los residuos de la montaña y los convierte en energía para usarla en otros lugares. Estas mejoras, junto con su membresía de la *Alpine Convention* confirman que Kaprun está abriendo nuevas puertas a la sostenibilidad en Austria y Europa³.

Los constructores de Avoriaz (Francia), diseñaron un complejo *eco-friendly* que centra sus esfuerzos en la reducción de emisiones de carbono y el reciclaje. Los coches no están permitidos y el complejo utiliza biofuel creado a partir de aceite de cocina. La estación incluso construyó los tejados con una mayor resistencia a la nieve para poder usar la misma nieve como aislamiento y

¹ <https://www.aspensnowmass.com/>

² <https://www.jacksonhole.com/>

³ <https://www.zellamsee-kaprun.com/en>

así aumentar la temperatura en el interior de forma natural⁴.

Otro ejemplo es el de Bolton Valley (Vermont, USA). Allí comenzó la revolución de la energía eólica, usando este tipo de energía desde 2009. Muchos de los restaurantes de la zona se están aprovisionando con alimentos cosechados localmente. Esto apoya las comunidades locales y refuerza la visión de sostenibilidad de la región. La estación de esquí utiliza únicamente bolsas de basura recicladas por una compañía local y composta todos los residuos orgánicos para la creación de tierra vegetal y su uso por la comunidad⁵.

En algunas estaciones de esquí ya se están adoptando medidas de introducción de energías renovables para hacer frente a la demanda energética. El ejemplo más significativo se da en Jiminy Peak Mountain Resort, Hancock (Massachusetts, USA)⁶. En agosto de 2007 empezó a funcionar un aerogenerador de 1,5 MW⁷ para generar electricidad y hacer frente a la demanda energética de la estación.

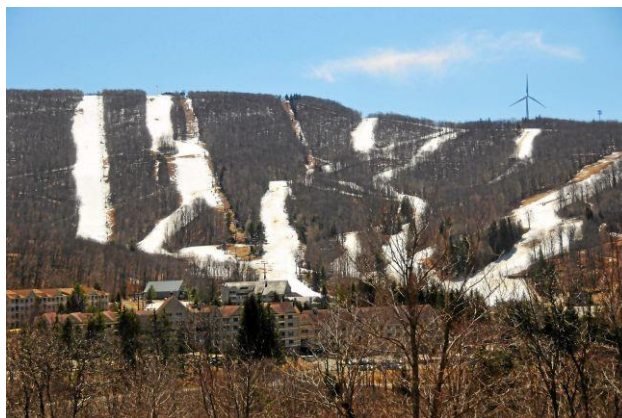


Figura 1.1: Jiminy Peak Mountain Resort con el aerogenerador GE 1,5 MW

Otro ejemplo muy interesante es el de Berkshire East Mountain Resort⁸ (Massachusetts, USA). Se trata de una estación que genera el 100% de su electricidad a partir de energías renovables. Por un lado, Tiene instalados 500 kWp de potencia solar fotovoltaica con 1800 paneles en una superficie de 10 acres (40468 m²). Por otro lado, dispone de un aerogenerador de 900 kW de potencia.



Figura 1.2: Planta solar en Berkshire East Mountain Resort

⁴ <http://www.avoriaz.com/>

⁵ <http://www.boltonvalley.com/>

⁶ <http://edition.cnn.com/2009/TECH/02/27/ski.wind.turbine/>

⁷ <https://nawindpower.com/massachusetts-ski-resort-celebrates-decade-wind-energy>

⁸ <https://berkshireeast.com/berkshire-renewable-energy/>

En Estados Unidos además, estaciones como Lake Tahoe (California, USA)⁹, también disponen de tecnología de generación eólica. En Australia se están llevando a cabo proyectos que incluyen aerogeneradores como solución a los problemas del consumo energético: siete estaciones del estado de Victoria serán impulsados por energía eólica además de utilizar agua reciclada para la producción de nieve¹⁰.

Un ejemplo cercano y muy interesante es el proyecto que se va a llevar a cabo en la estación de esquí Sierra de Béjar-La Covatilla (Salamanca). En este proyecto se han planificado una minicentral hidroeléctrica, una planta solar fotovoltaica, un parque eólico y el cambio de la caldera de gas por una de biomasa. El proyecto realizado incluye la colocación de 4.053 m² de paneles solares fotovoltaicos sobre marquesinas en la zona de aparcamientos, la instalación de 29 aerogeneradores de 93 m de altura en las proximidades de la carretera de acceso a la estación de esquí y la instalación de una minicentral para recoger el agua del deshielo de la nieve mediante un azud situado fuera de la estación de esquí, con un salto de agua de 140 m (Pato 2018).

1.1. El efecto del cambio climático en el turismo de nieve

A día de hoy, es el turismo hibernal el que ha sufrido las mayores consecuencias del cambio climático, debido a su mayor dificultad de adaptación que el turismo de sol y playa (Carbajo Molina 2016). Cada vez es más preciso el conocimiento sobre el manto nival y su renovación anual, así como los dominios esquiabiles potenciales.

Los diversos macizos montañosos presentan una gran diversidad en cuanto a sus características: ubicación latitudinal meridional o septentrional o su altura. Son parámetros que determinan sus condiciones ambientales, el régimen de innivación y la disponibilidad del recurso de nieve. En el Pirineo, buena parte de las precipitaciones que se dan durante los meses de invierno son en forma de nieve y son varios los lugares y zonas que registran entre 20 y 30 días de nieve al año, con grosores destacados y permanencia de la nieve durante varios meses. En el Pirineo catalán, la cota de nieve comienza a ser significativa a 1500 m. Sin embargo, es a partir de la cota 1800 donde los grosores de la nieve son mayores y ésta se mantiene superior a los 15 cm entre los meses de diciembre y abril (López Palomeque 1996).

La irregularidad de la nieve ha hecho que se tengan que adoptar medidas para asegurar y permitir la práctica del esquí superando los condicionantes climáticos. Es el caso de la fabricación de nieve, mediante cañones de producción de nieve. Esta práctica es habitual en todas las estaciones de esquí desde que la estación de La Molina instalase los primeros cañones en el año 1985¹¹.

Existen evidencias del impacto del cambio climático en el turismo de invierno. Por un lado están las evidencias científicas, basadas en diversos estudios (El Kenawy et al. 2012), que demuestran el leve aumento de la temperatura en las montañas (Beniston 2003), menor grosor medio de nieve y mayor irregularidad temporal y territorial de la innivación (Pons et al. 2015). En el Pirineo, las precipitaciones en forma de nieve han ido a menos del mismo modo que las temperaturas en invierno han aumentado (especialmente entre febrero y marzo). Prueba de ello es la reducción de los glaciares (Serrano 2005), efecto apreciable visualmente. En los glaciares Pirenaicos se ha fundido la mitad de la masa glaciar desde los años 80. Por otro lado, están las evidencias vivenciales, que tienen que ver con la sensación y percepción de los esquiadores veteranos, que afirman un aumento en la cota de nieve y una disminución de la misma en cotas bajas (Pulido et al. 2016).

⁹ <http://www.climateaction.org/news/first-us-ski-resort-to-operate-on-100-percent-renewable-energy>

¹⁰ <https://www.nevasport.com/noticias/art/24476/Los-remontes-australianos-usaran-energia-eolica/>

¹¹ <https://solonieve.es/reportajes/el-misterio-artificial/>

1.2. La necesidad de una buena gestión energética

Existen razones de peso para implementar medidas de conservación, incluyendo prevención de la contaminación, un aire más limpio y la lucha contra el calentamiento global. Las medidas de eficiencia energética pueden contribuir positivamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, una de las razones más convincentes para las estaciones de esquí es el ahorro inmediato que resulta de un menor consumo de energía, agua y materiales. Implementando algunas medidas relativamente simples, diseñadas para reducir el consumo, las estaciones de esquí pueden ahorrar dinero que posteriormente pueden utilizar en medidas de conservación a largo plazo (NSAA 2006).

Una inversión a largo plazo necesita una inversión inicial para llevar a cabo programas y medidas. Sin embargo, estas inversiones se amortizan a lo largo del tiempo gracias a los ahorros conseguidos al implementarse. No se trata solamente del reembolso financiero que pueden suponer estas inversiones, sino que muchas medidas de conservación implican la preservación de áreas de esquí y que además siguen el camino de un desarrollo sostenible que pueda sostener el esquí en un futuro (NSAA 2006).

Una estación de esquí que se implica en actividades de conservación y preservación tendrá una mejor apariencia para sus clientes y comunidad. Además, se beneficiará de la benevolencia de forma incalculable en cuestión de lealtad de clientes y apoyo de la comunidad. Por otro lado, un pensamiento estratégico sobre la conservación aumenta los estándares, inspira a los empleados y se gana el beneplácito de los clientes y la comunidad donde reside.

El objetivo es obtener beneficios de cada proyecto energético. Por ejemplo, el claro beneficio de realizar mejoras en la iluminación es la reducción de costes asociados a un menor consumo de energía. Sin embargo, un beneficio residual a menudo mejora la productividad de los empleados. En el caso de instalar termostatos programables, se aumentaría el confort de los trabajadores, a la vez que se ahorra energía. Es más, los proyectos energéticos que suponen la instalación de nuevos sistemas no sólo reducen los costes energéticos, sino que también reducen los costes de mantenimiento asociados a sistemas obsoletos y deficientes. Las medidas de ahorro energético están raramente aisladas y en muchas ocasiones superan las expectativas globales.

1.3. Modelos de planificación energética

La planificación energética, tiene como principal objetivo garantizar el suministro energético en situaciones de máxima demanda al menor coste posible y respetando el medio ambiente. Por ello, es imprescindible hacer una previsión de la evolución que tendrá la demanda energética de cara al futuro que se pretende planificar. La planificación energética busca entender las necesidades energéticas futuras y las actuaciones que deben llevarse a cabo para lograr su principal objetivo (Ministerio de Industria Energía y Turismo 2015).

La energía es un insumo vital para el desarrollo económico y tecnológico de cualquier empresa que se dedique a la explotación de una estación de esquí. La formulación de un modelo energético podría ayudar en la asignación adecuada de fuentes de energía renovable ampliamente disponibles como energía solar, eólica, bioenergética y pequeña energía hidroeléctrica para satisfacer la futura demanda de estaciones de esquí. Durante la última década, surgieron varios conceptos nuevos de planificación y gestión energética, como la planificación descentralizada, la conservación de la energía mediante tecnologías mejoradas, el reciclado de residuos, la planificación integrada de la energía, la introducción de fuentes de energía renovables y la previsión energética.

Para llevar a cabo una revisión de los modelos de previsión de demanda de energía se ha recurrido al documento *Energy Models for demand forecasting – A review* (Suganthi and Samuel 2012). A continuación, se recogen los modelos energéticos revisados.

- Modelos de series temporales: son los modelos más simples que utiliza un análisis de tendencias de series temporales para extrapolar el requerimiento energético futuro.

- Modelos de regresión: han sido utilizados para pronosticar el requerimiento de carbón, petróleo, gas y electricidad. También las predicciones energéticas son muy importantes en el marco de las políticas energéticas.
- Modelos econométricos: relacionan la demanda de energía con otras variables macroeconómicas.
- Modelos de descomposición: Dos enfoques comunes para la descomposición son el consumo de energía (EC) y la intensidad de energía (EI). En el enfoque del consumo de energía, los efectos básicos especificados están asociados con el cambio en el nivel de producción agregada, cambio estructural en la producción y cambios en intensidades energéticas, mientras que en el enfoque de intensidad energética solo los dos últimos efectos son considerados.
- Modelos de cointegración y corrección de errores: han sido aplicados para examinar su correlación. Los modelos de cointegración fueron usados con modelos multivariantes para examinar la influencia del producto interior bruto, ingresos, grados-día de calefacción, población, precio de la energía en la demanda energética en varios países.
- Modelos ARIMA: han sido extensamente utilizados en la previsión de la demanda energética. Un sistema de soporte de decisión para la predicción de la producción de combustibles fósiles se desarrolla usando una regresión, los métodos ARIMA y SARIMA.
- *Expert Systems* y modelos ANN: En el pasado, sistemas expertos y redes neurales fueron usados extensamente para la previsión de carga eléctrica. En tiempos recientes, se están utilizando también para proyecciones de demanda energética a largo plazo, considerando variables macro económicas. Las redes neurales se utilizan para modelar en consumo energético de los electrodomésticos, iluminación y refrigeración de espacios en el sector residencial canadiense. El consumo energético para Grecia se predice utilizando la técnica de: *artificial neural-network (ANN)* (Economou 2010)
- *Grey prediction*: Los modelos grises se basan en la teoría gris desarrollada por Deng. Una de las ventajas de los sistemas grises es su fácil aplicación ya que no requiere conocer la distribución de los parámetros y no requiere modelos intermedios complejos. Un sistema gris es un sistema que no es “blanco” (sistema de información completamente conocido) ni “negro” (sistema de información completamente conocido) (Muñoz Jiménez 2014). Ganó popularidad en la pasada década debido a su simplicidad y capacidad de caracterizar sistemas desconocidos mediante el uso de algunos *data points*. La previsión de demanda energética puede considerarse como un problema de sistema gris, debido a que algunos factores como el PIB, el ingreso o la población, influyen la demanda energética pero no se sabe exactamente cómo.
- Modelos *input-output*: son utilizados para evaluar cómo los cambios sociales y económicos afectarán a los requerimientos energéticos y la intensidad energética en China. Para ello, se desarrollaron seis escenarios introduciendo los factores de impacto más importantes como el avance tecnológico, la población, el ingreso y la urbanización.
- *Genetic algorithm*: Recientemente, las técnicas de *soft computing*, están siendo utilizadas para la previsión de demanda energética. El algoritmo genético ha sido utilizado para estimar la demanda energética de Turquía utilizando indicadores económicos tales como el PIB, la población, las importaciones y las exportaciones. Los modelos de estimación de la demanda con el algoritmo genético, se desarrollan para determinar los requerimientos futuros de carbón, petróleo y gas natural (Canyurt and Ozturk 2008).
- *Fuzzy logic*: La lógica difusa proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en el conocimiento. La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por un computador. Se ha utilizado para la previsión a corto plazo de las operaciones en sistemas de potencia (Ahmadi et al. 2012).

- Algunas de las últimas técnicas tales como *Bayesian vector autorregression*, *support vector regression*, *ant colony*, modelos *particle swarm optimization* están siendo utilizados para el análisis de demanda energética.

Entre todos los modelos energéticos, es de especial interés para nuestra aplicación el bloque de modelos denominados como *bottom-up*. Para llevar a cabo el diseño de estos modelos, las partes individuales se diseñan con detalle y posteriormente se enlazan para conseguir componentes más grandes, que a su vez se combinan para formar el sistema completo. La principal fortaleza de este tipo de modelos es que su alto nivel de desagregación permite el análisis del potencial de estrategias en ámbitos concretos.

- Modelo MARKAL (acrónimo de MARKet ALlocation): es un modelo *bottom-up*, una técnica dinámica que fue originalmente desarrollado como un modelo de programación lineal de menor coste. Este modelo representa tanto el suministro como la demanda energética a ambos lados del sistema. Se trata de una herramienta analítica que puede adaptarse para modelar diferentes sistemas energéticos a nivel nacional, estatal y regional. El modelo MARKAL también se utiliza para estudiar el impacto de las políticas energéticas. Las estrategias de mitigación de carbono pueden ser estudiadas utilizando este modelo. Los escenarios se desarrollan utilizando el marco “what if”.
- Modelo *Time G5*: La demanda energética sectorial y de las fuentes se determinan usando indicadores clave tales como la población, PIB, personas-km, PIB per cápita, calefacción per cápita, cocina per cápita, calor por PIB, refrigeración por PIB.
- Modelo *Long-range Energy Alternatives Planning system* (LEAP): fue desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* en Boston (SEI-B). Se trata de un marco de contabilidad *bottom-up* que es utilizado para la previsión. El modelo LEAP también ha sido desarrollado para modelar necesidades energéticas a nivel nacional, estatal y regional.

Usando el criterio de propósito/objetivo, los modelos energéticos pueden clasificarse en las siguientes categorías generales: modelos de demanda, modelos de oferta y modelos de sistemas. Los modelos de sistemas, se utilizan para analizar el sistema energético en su totalidad incluyendo tanto oferta como demanda. Este es el caso de LEAP.

En la clasificación según la cobertura espacial, se tiene en cuenta el propósito para el que los modelos son desarrollados. LEAP es un modelo principalmente usado para planificación nacional. Sin embargo, su flexibilidad permite adaptarlo fácilmente a distintas escalas espaciales.

En tercer lugar está la clasificación *bottom up* o *top down*. Por un lado existe el enfoque más asociado a los modelos microeconómicos llamado *bottom up*. Éstos disponen de una fuerte base ingenieril y además, suelen especificarse los requerimientos energéticos de equipos y maquinarias para determinar su consumo energético. Por otro lado, están los modelos de corte macroeconómico llamados *top down* (Bazán Navarrete and Ortiz Muñiz 2010). La Tabla 1.1 recoge una comparativa entre los dos tipos de modelos.

Top down	Bottom up
Usa datos económicos agregados	Usa datos detallados en combustibles
Evalúa costos/beneficios a través de impactos en producción, ingreso, PIB	Evalúa costos/beneficios de tecnologías y políticas individuales
Generalmente asume eficiencia de mercados	No necesariamente asume eficiencia de mercados, sobrepasar barreras de mercado efectivos
Captura retroalimentación e interacciones intersectoriales	Captura interacciones entre proyectos y políticas

No es un enfoque adecuado para examinar políticas tecnológicas específicas.	Utilizado para evaluar costos y beneficios de programas.
---	--

Tabla 1.1. Comparación de modelos *top down* y *bottom up* (Fuente: <https://www.energiaadebate.com/>)

1.4 El modelo de turismo de nieve de los Pirineos

Los Pirineos son las montañas que conforman la barrera natural entre Francia y España, así como entre la península Ibérica y el resto de Europa. Los Pirineos se localizan en el suroeste de Europa, y la región incluye el pequeño país de Andorra. Históricamente, los Pirineos han sido muy influyentes en la cultura de las poblaciones circundantes, no solo en sus historias sino también en sus actividades. Es costumbre en los Pirineos rurales el pastoreo de trashumancia, en el que el ganado se traslada desde las granjas a las zonas de alta montaña durante el verano.

Hoy en día, ambas vertientes de los Pirineos son destinos muy frecuentados para realizar actividades recreativas como el esquí y el montañismo¹². La vertiente española del Pirineo se divide a su vez en el Pirineo Navarro, Pirineo Aragonés y Pirineo Catalán.

En el Pirineo Navarro no existen estaciones de esquí.

En el Pirineo Aragonés¹³ las estaciones son:

- Astún (50 km esquiables)
- Candanchú (50,5 km esquiables)
- Cerler (81 km esquiables)
- Formigal (141 km esquiables)
- Panticosa (39 km esquiables)

En el Pirineo Catalán¹⁴ los dominios esquiables son:

- Baqueira Beret (152 km esquiables)
- Boí Taüll (45 km esquiables)
- Espot Esquí (25 km esquiables)
- La Molina (68 km esquiables)
- Masella (74 km esquiables)
- Port Ainé (26,7 km esquiables)
- Port del Compte (50 km esquiables)
- Tavascan (6 km esquiables)
- Vall de Nuria (7,6 km esquiables)
- Vallter 2000 (18,7 km esquiables).

El Pirineo catalán, y todo el conjunto del sistema montañoso, constituye un espacio turístico singular debido a las condiciones geográficas específicas de la montaña y a la configuración de un turismo diferenciado.

¹² <http://www.geoenciclopedia.com/pirineos/>

¹³ <https://www.infonieue.es/estaciones-esqui/>

¹⁴ <https://www.infonieue.es/estaciones-esqui/>

El turismo de esquí, asociado a la práctica de este deporte, aparece hace 40 años y representa en términos generales el tipo de turismo de mayor impacto social, económico y territorial.

Actualmente existen posibilidades potenciales para explotar dominios de nieve. Sin embargo, la irregularidad de la innivación da lugar a una inseguridad del negocio de las estaciones de esquí. Por este motivo, se están adoptando estrategias para poder cubrir las carencias de nieve con tecnologías productoras de nieve artificial.

Estas circunstancias hacen que sea necesario resolver problemas actuales y planificar el desarrollo de las potencialidades. La montaña pirenaica tiene ahora nuevas demandas y prácticas turísticas. La complejidad reside en lograr la complementariedad comercial, estacional y territorial del turismo de esquí. Además, debe integrar el paradigma del desarrollo sostenible dadas las nuevas condiciones sociales y económicas (López Palomeque 1996).

Baqueira Beret está considerada la mejor estación del Pirineo Catalán¹⁵ y es además la estación de esquí más grande de toda la península Ibérica¹⁶, siendo la única que recibe la calificación de “muy grande” según la clasificación francesa de las estaciones de esquí por momento de potencia (Domaines esquiables de France 2011). Por todo esto y por la posibilidad de conseguir datos fidedignos sobre la demanda energética, potencia de los equipos consumidores de electricidad, parque vehicular y conocimiento del entorno por parte del autor, se ha elegido Baqueira Beret como estación para llevar a cabo el análisis de eficiencia energética y estudio de la posibilidad de introducción de energías renovables.

¹⁵<https://www.nieveplus.com/las-mejores-estaciones-esqui-los-pirineos/>

¹⁶<https://www.nevasport.com/rmeee/art/36267/Clasificacion-de-las-Estaciones-de-Esqui-Espanolas-y-Portuguesa-por-Momento-de-Potencia-Temporada-201718/>

2. Definición de objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es analizar el comportamiento energético de una estación de esquí del Pirineo y explorar escenarios futuros basados en distintas hipótesis.

2.2. Objetivos específicos

A continuación se detallan los objetivos específicos del presente trabajo.

- Modelización energética de una estación de esquí, entendiendo ésta como un sistema energético.
- Explorar los posibles efectos del cambio climático sobre las estaciones de esquí, desde un punto de vista energético.
- Analizar el potencial de ahorro de energía y emisiones de la eficiencia energética mediante el modelo implementado.
- Estudiar la posibilidad de introducción de energías renovables y los beneficios aportados.

3. Modelo de planificación energética LEAP-Baqueira

3.1. Caso de estudio

La estación objeto de estudio es Baqueira Beret, perteneciente a Baqueira Beret S.A. Baqueira Beret es la mayor estación de esquí de España. Tiene una capacidad de transporte de 60144 esquiadores/hora y cuenta con una superficie de 2166 ha, en la que alberga 157 km de pistas pisadas, 3 itinerarios (5 km) y 7 km de esquí de fondo. A continuación, la Figura 3.1, muestra la localización de la estación de esquí en el Pirineo catalán.



Figura 3.1: Localización de Baqueira Beret (Fuente: Google Maps)

La cota mínima está a 1500 m y la máxima a 2510 m teniendo así un desnivel de 1010 m. Alberga también un Snowpark (zona habilitada para la práctica del *freestyle*, saltos y acrobacias), Stadium de slalom (para la práctica de competición) y Audi Ski Kronos (espacio patrocinado por Audi en el que se llevan a cabo simulaciones de competición para todos los usuarios). Tiene también una zona *freeride* (fuera de pista). Para cubrir estas instalaciones hay 35 remontes:

- 1 telecabina (9 plazas)
- 19 telesillas
 - 10 desembagables: 3 de 6 plazas, 7 de 4 plazas
 - 9 pinza fija: 6 de 3 plazas, 3 de 2 plazas
- 8 telesquís
 - 4 telesquís
 - 2 telesquís biplaza
 - 2 telecuerdas
- 7 cintas transportadoras

En Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3 que se exponen a continuación, se recoge información detallada de todos los remotes de cada uno de los tres sectores.

BAQUEIRA

Tipo	Nombre	Viaje minutos	Desnivel metros	Capacidad persona/hora	Hora apertura	Hora cierre
TC	Baqueira	6	384	3.000	8:45	16:45
TSD	Bosque	4	360	2.880	8:45	16:45
TSD	Pla de Baqueira	6	500	3.000	9:00	16:45
TSD	Mirador	8	603	2.880	9:00	16:45
TSD	Era Cabana	3	195	2.400	9:00	16:45
TSD	Jorge Jordana	8	629	2.400	9:00	16:45
TS	Esquírrs	6	185	1.200	8:45	16:45
TQ	Rabada	2	49	540	9:00	16:45
CT	Baqueira	1	4	1.200		
CT	Carreretes 1	3	14	1.200	9:00	16:45
CT	Carreretes 2	3	18	1.200	9:00	16:45
CT	Parc Infantil	2	4	1.200		
CT	Bosque	4	18	1.200		

Tabla 3.1. Información sobre los remotes del sector Baqueira (Fuente: Baqueira Beret)

BERET

Tipo	Nombre	Viaje minutos	Desnivel metros	Capacidad persona/hora	Hora apertura	Hora cierre
TSD	Dera Reina	7	499	3.000	9:00	16:45
TSD	Blanhíblar	6	381	2.880	9:00	16:45
TSD	Jesús Serra	6	313	2.400	9:00	16:45
TS	Pla de Beret	6	126	1.286	9:00	16:45
TS	Clot der Os	14	363	1.800	9:00	16:45
TS	Dossau	12	536	1.800	9:15	16:30
TQ	Costarjäs	6	203	1.437	9:15	16:30
TQ	Fernández-Ochoa	8	377	1.200	9:00	16:45
TQ	Saumet	5	378	900	9:15	16:30
TCD	Dossau	2	11	1.440	9:15	16:30
CT	Beret	1	3	1.200		
CT	Parc Infantil	1	5	1.200		

Tabla 3.2. . Información sobre los remotes del sector Beret (Fuente: Baqueira Beret)

BONAIGUA

Tipo	Nombre	Viaje minutos	Desnivel metros	Capacidad persona/hora	Hora apertura	Hora cierre
TSD	Bonaigua	5	284	2.400	9:00	16:45
TSD	La Peüllá	4	413	2.400	9:00	16:45
TS	Solei	5	178	1.800	9:15	16:30
TS	Manaud	9	439	1.800	9:15	16:30
TS	Argull's	11	268	1.800	9:15	16:30
TS	Teso dera Mina	11	344	1.800	9:15	16:30
TS	Cap del Port	8	28	1.200	9:00	16:45
TQ	Tuc de la Llança 1	5	201	720	9:15	16:30
TQ	Tuc de la Llança 2	5	201	720	9:15	16:30
TCD	Cap del Port	1	5	720	9:00	16:45

Tabla 3.3. Información sobre los remotes del sector Bonaigua (Fuente: Baqueira Beret)

En lo que al mantenimiento y cuidado de las pistas se refiere, dispone de 654 cañones de producción de nieve y 15 máquinas para la preparación y pisado de las pistas. El momento de potencia es de 18209 [km-Esq/h] y se calcula con la fórmula (3.1):

$$\text{Momento de potencia} = \sum_i^n \frac{\text{Capacidad de transp.}_i \times \text{desnivel}_i}{1000} \quad (3.1)$$

Se trata por tanto, según la clasificación francesa de las estaciones por momento de potencia, de una estación “muy grande” (MP>15000) (Domaines esquiables de France 2011).

Por otro lado, hay que tener en cuenta los diversos servicios complementarios:

- 5 locales de alquiler y reparación de esquís
- 7 aparcamientos con un total de 5040 plazas
- 25 cafeterías y restaurantes
- 4 parques infantiles de nieve
- 2 puntos de primeros auxilios en pistas,
- 1 centro médico privado en núcleo Baqueira 1.500
- más de 500 profesores de esquí
- núcleo residencial a pie de pistas con hoteles, apartamentos, restaurantes, discotecas y centros comerciales¹⁷.

La Figura 3.2, muestra el plano completo de la estación, con todos los servicios comentados anteriormente.

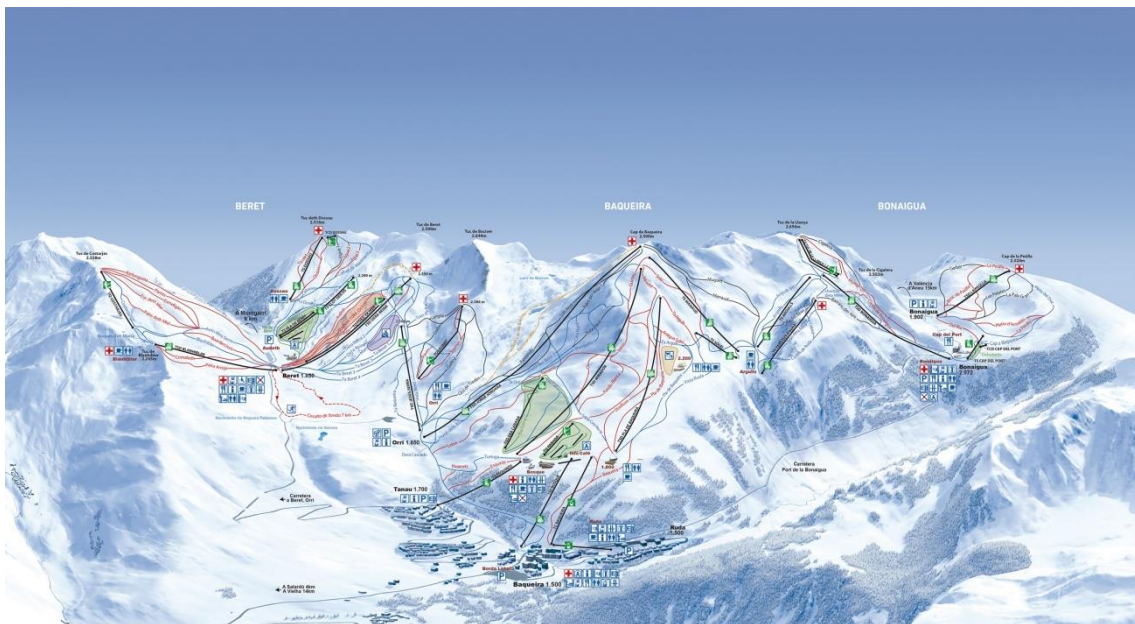


Figura 3.2: Plano de la estación (Fuente: Baqueira Beret)

3.2. Elección y justificación del modelo

LEAP es una herramienta de modelado integrada basada en escenarios que se puede utilizar para rastrear el consumo de energía, la producción y la extracción de recursos en todos los sectores de una economía¹⁸. Se puede usar para tener en cuenta fuentes y sumideros de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector de la energía y del sector no energético. Además de rastrear GEI, LEAP también se puede utilizar para analizar las emisiones de contaminantes atmosféricos locales y regionales, y los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), lo que lo hace

¹⁷ <https://www.baqueira.es/>

¹⁸ <https://www.energycommunity.org/>

adecuado para estudios de los beneficios colaterales climáticos de la reducción de la contaminación del aire local.

LEAP es lo suficientemente flexible para los usuarios con una amplia gama de conocimientos: de los principales expertos mundiales que desean diseñar políticas y demostrar sus beneficios a los responsables de la toma de decisiones, a los formadores que desean desarrollar la capacidad entre los jóvenes analistas que se están embarcando en el desafío de comprender la complejidad de los sistemas de energía.

LEAP no es un modelo de un sistema de energía en particular, sino una herramienta que se puede usar para crear modelos de diferentes sistemas de energía, donde cada uno requiere sus propias estructuras de datos únicas. LEAP admite una amplia gama de metodologías de modelado diferentes: por el lado de la demanda, estas van desde las técnicas de contabilidad de abajo hacia arriba y de uso final hasta los modelos macroeconómicos de arriba hacia abajo.

LEAP está pensado como una herramienta de modelado a mediano y largo plazo. La mayoría de sus cálculos ocurren en un paso de tiempo anual, y el horizonte de tiempo puede extenderse por un número ilimitado de años. Los estudios suelen incluir un período histórico conocido como *Current Accounts*, en el que el modelo se ejecuta para probar su capacidad de replicar datos estadísticos conocidos, así como múltiples escenarios prospectivos. Por lo general, la mayoría de los estudios usan un período de pronóstico de entre 20 y 50 años.

Uno de los puntos fuertes de LEAP es su bajo requerimiento inicial de datos. Muchas herramientas de modelización se basan en algoritmos de solución muy particulares y, a menudo, bastante complejos, tales como la optimización, por lo que tienden a tener requisitos de datos altamente inflexibles. Desarrollar los datos para tales modelos es una tarea que consume tiempo y que requiere niveles relativamente altos de experiencia. Por el contrario, dado que proporciona una selección de metodologías de modelización y muchos aspectos de LEAP son opcionales, tiene requisitos de datos iniciales mucho más bajos y permite a sus usuarios comenzar a construir modelos basados en principios de contabilidad relativamente simples. Las estructuras de datos adaptables y transparentes de LEAP se adaptan bien a un enfoque analítico iterativo: uno en el que el usuario comienza creando rápidamente un análisis inicial que es lo más simple posible. En iteraciones posteriores, el usuario agrega complejidad solo cuando los datos están disponibles y donde el detalle agregado proporciona información útil adicional sobre las preguntas que se abordan en el análisis.

Por todas estas ventajas y puntos positivos que el software LEAP ofrece, se ha elegido esta herramienta para llevar a cabo el modelo de demanda y consumo energético así como la transformación energética. Para el caso de estudio la estación se entiende como un sistema energético o un sector concreto.

Por otro lado, los modelos de LEAP han sido utilizados para la planificación de sistemas energéticos a nivel estatal, por ejemplo en US Country Studies program (USCS) (Sathaye et al. 1997).

También se ha utilizado para estudiar el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector del transporte en Medellín, Colombia y su contribución al cambio climático (Martínez-Jaramillo et al. 2017). En Nepal, se ha utilizado para el estudio de la demanda energética de la red de transporte y las emisiones medioambientales (Bajracharya and Bhattarai 2016). En Vietnam, se han llevado a cabo análisis del potencial de mitigación de gases de efecto invernadero gracias a tecnologías de biomasa (Kumar et al. 2003). Otro caso de aplicación de LEAP se dio en Taiwán, donde el software se utilizó para hacer un estudio a largo plazo de la demanda y suministro del sector energético (Huang et al. 2011). En Ciudad de México, se utilizaron modelos LEAP para estudiar el impacto que podía tener la introducción de tecnologías y combustibles renovables en el sector del transporte (Manzini 2006).

3.3. Descripción general del modelo

El eje central de este trabajo se centra en la implementación de un modelo integrado para el análisis de la demanda energética de la estación de esquí Baqueira Beret. De este modo, se podrá llevar a cabo la construcción de escenarios de futuro y el análisis de eficiencia energética e introducción de energías renovables.

El modelo LEAP-Baqueira es un modelo de simulación que se basa principalmente en las técnicas *bottom-up*. Una de las funciones principales del modelo es analizar la demanda energética de la estación, entendiendo ésta como un sistema energético en su totalidad.

La demanda energética de la estación se basa en electricidad y consumo de combustibles fósiles (gasolina, diésel). Como se ha explicado, el análisis *bottom-up* se cimienta en un método más ingenieril en el que se tienen en cuenta las diferentes tecnologías consumidoras de energía. Por ello, se detallarán las diferentes tecnologías para determinar con precisión cuál es el consumo de cada una de ellas. La Figura 3.3 muestra la estructura de árbol del modelo LEAP-Baqueira. A partir de aquí, se ha construido un escenario de referencia en el que se mantienen las tendencias actuales. Los diferentes escenarios se crean en base a la evolución de diferentes variables tales como: el aumento de temperatura en la superficie terrestre, necesidad de producción de nieve, costes de la energía, adopción de medidas de eficiencia energética, evolución del número de visitantes y la introducción de energías renovables.

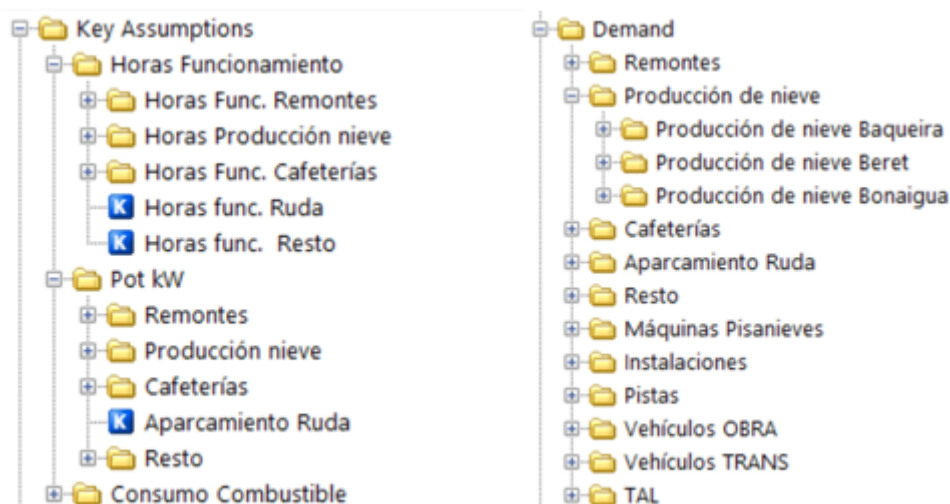


Figura 3.3: Estructura del árbol del modelo LEAP-Baqueira

El periodo temporal que abarca el modelo LEAP-Baqueira es hasta final del siglo XXI. Esto se debe a que para valorar los impactos de diferentes políticas energéticas o en nuestro caso concreto, de diferentes escenarios determinados por distintas tendencias, se deben tomar 50 o 100 años. El cambio climático es un proceso relativamente lento, y para observar los efectos del mismo en el medio ambiente debe tomarse un lapso de tiempo largo. El modelo inicia en 2016, año para el cual se tienen los datos de consumo energético y finaliza en 2100 (final de siglo).

Como se ha descrito anteriormente, LEAP es un software pensado para implementarlo a escala nacional. Sin embargo, el modelo LEAP-Baqueira se tomará como una escala sub-nacional, tomando la estación de esquí en su totalidad como si de una región ficticia se tratara, con toda su demanda energética.

3.3.1. Contabilización de las emisiones

LEAP ofrece la posibilidad de visualizar o editar datos sobre diferentes efectos ambientales (es decir, contaminantes y otros impactos ambientales directos). LEAP incluye un conjunto predeterminado de datos para 258 efectos diferentes, incluida la documentación sobre la

naturaleza de muchos efectos importantes. La lista de efectos incluye todos los gases enumerados en la evaluación más reciente sobre cambio climático del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, AR5 2013). Cada efecto se enumera por nombre y también incluye un campo secundario que contiene una abreviatura o, en algunos casos, la fórmula química del efecto. Los efectos se dividen en categorías, incluidos los principales gases de efecto invernadero (GEI), contaminantes atmosféricos locales, otros efectos (como desechos sólidos, efluentes de agua, lesiones, muertes, degradación de la tierra, etc.) y grandes grupos de sustancias químicas como alcoholes halogenados, éteres, hidrofluorocarbono, clorocarbonos, hidroclorocarbonos, bromocarbonos, hidrobromocarbonos y halones, etc.

En el modelo LEAP-Baqueira se añaden los efectos para los equipos consumidores de energía térmica (combustibles fósiles). Las emisiones de la electricidad se contabilizan en el módulo de generación.

Se han considerado dos metodologías diferentes de acuerdo con las directrices establecidas por el IPCC en el ámbito de la energía (IPCC, 2006): *Tier 1* y *Tier 2* según conveniencia, con el objetivo de ser lo más preciso posible.

- *Tier 1*: Máquinas pisanieves, vehículos de obra y vehículos de transporte
- *Tier 2*: Instalaciones, pistas y taller

Para todos estos escenarios, hay que especificar los valores *GWP* (*Global Warming Potential*). El índice *GWP* es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, por lo general dióxido de carbono. Para este caso, se seleccionarán los valores del *IPCC Fifth Assessment* (AR5, 2013, *No Climate Feedbacks*). El IPCC ha publicado 5 Informes de Valoración desde hace varias décadas. El último, el Quinto, vio la luz entre 2013 y 2014. El *Assessment Report 5* (AR5) consta de 5 libros, correspondientes a los varios Grupos de Trabajo: 1.- La Base Científica Física, 2.- Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad (Parte A y Parte B), 3.- Mitigación y CC y 4.- Informe de Síntesis.

3.4. Hipótesis macroeconómicas

3.4.1. Clientes de la estación

La estación inauguró temporada el sábado 28 de noviembre y cerró el domingo 4 de abril por lo que fueron 129 días en funcionamiento con 10635724 personas transportadas. A continuación se muestra la Tabla 3.4 donde se recoge el número de personas transportadas cada curso desde la temporada 1996-1997 hasta la 2017-2018. Además, la Figura 3.4, grafica esta evolución.

temporada	personas transportadas	incremento
1996 - 1997	4416462	
1997 - 1998	5342098	20,96%
1998 - 1999	6523319	22,11%
1999 - 2000	7858981	20,48%
2000 - 2001	4794420	-38,99%
2001 - 2002	7612018	58,77%
2002 - 2003	7632771	0,27%
2003 - 2004	7642165	0,12%
2004 - 2005	9400133	23,00%
2005 - 2006	9406823	0,07%
2006 - 2007	5423525	-42,34%
2007 - 2008	8296502	52,97%

2008 - 2009	9326240	12,41%
2009 - 2010	8788580	-5,77%
2010 - 2011	8974872	2,12%
2011 - 2012	8675316	-3,34%
2012 - 2013	8533148	-1,64%
2013 - 2014	8622723	1,05%
2014 - 2015	9363501	8,59%
2015 - 2016	10635724	13,59%
2016 - 2017	9532086	-10,38%
2017 - 2018	7815713	-18,01%

Tabla 3.4: Personas transportadas por temporada e incremento con respecto a la temporada anterior (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Baqueira Beret)

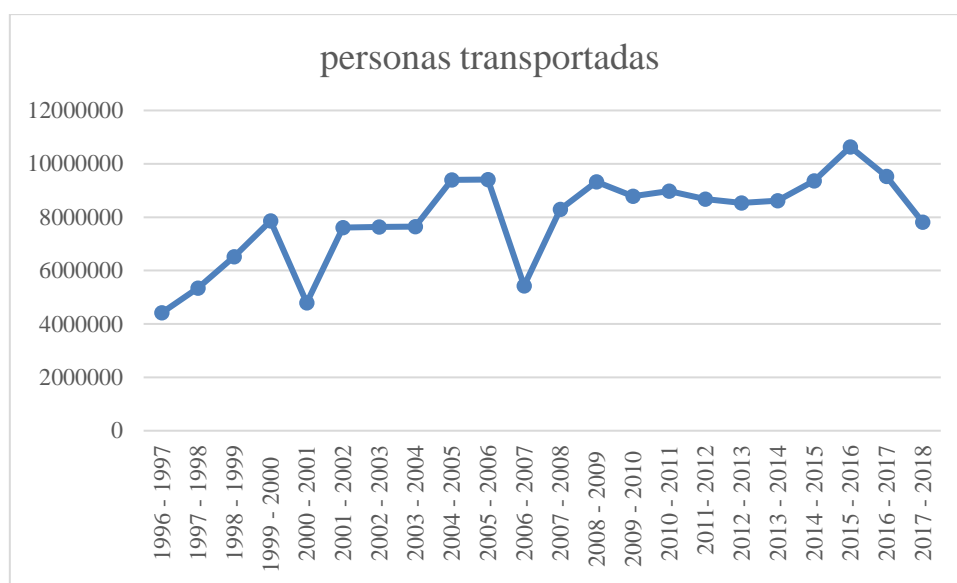


Figura 3.4: Personas transportadas desde 1996 hasta 2018 (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Baqueira Beret)

3.4.2. Precio del petróleo

La evolución del precio del petróleo se basa en el escenario de referencia del *Annual Energy Outlook* (EIA, 2018) y toma como referencia el petróleo Brent. El Brent es un tipo de petróleo que se extrae principalmente en el Mar del Norte y marca la referencia en los mercados europeos. La Figura 3.5 muestra la evolución del precio del petróleo considerada en el modelo. La tendencia en el precio del petróleo se puede dar por fiable y buena puesto que es similar a la publicada en otros informes como el *World Energy Outlook 2015* (IEA, 2015).

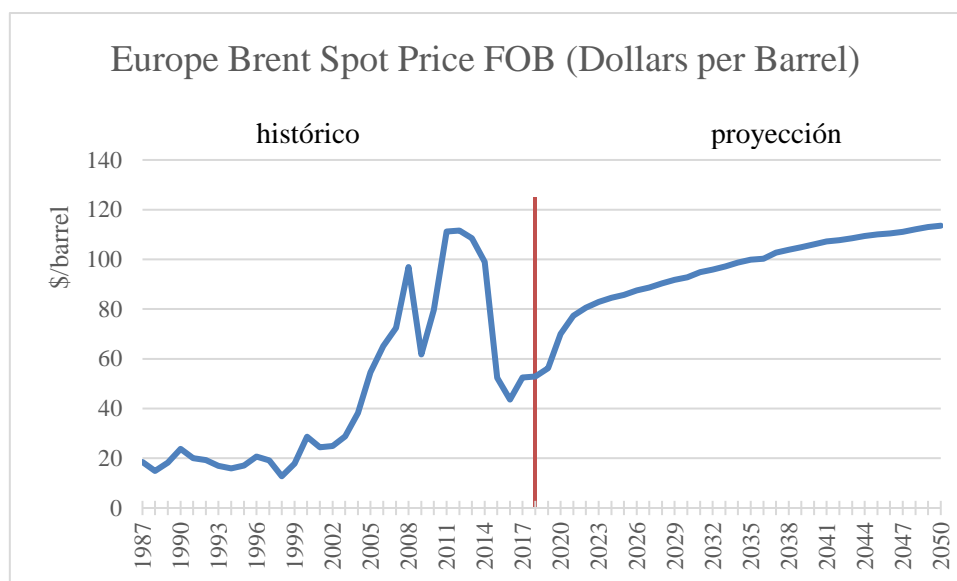


Figura 3.5: Histórico y evolución del precio del petróleo en el modelo LEAP-Baqueira. (Fuente: EIA 2018)

3.5. Modelización de la demanda energética

La modelización de la demanda energética se ha llevado a cabo a partir de una auditoría energética realizada para la temporada 2015-2016. Esta auditoría se realizó empleando una metodología que contempla los siguientes puntos:

- Datos generales
- Datos de producción
- Procesos productivos
- Análisis del suministro energético
- Actuaciones propuestas
- Anexos

Las horas de funcionamiento se han determinado para los remotes, los sistemas de producción de nieve, las cafeterías, parkings y otros equipos consumidores de electricidad. Las potencias instaladas también se han recogido para cada uno de los anteriores equipos consumidores. Por otro lado, el consumo de combustible recoge el volumen anual, en litros, de las máquinas pisanieves, las instalaciones, las pistas, los vehículos de obra, los vehículos de transporte y el taller mecánico.

3.5.1. Remotes

El consumo energético de los remotes para el transporte de personas en la estación se traduce en un gasto eléctrico.

3.5.1.1. Factor de carga

Cada remonte tiene una potencia instalada en concreto. Sin embargo, es muy difícil conocer cuál es el consumo energético de un remonte a partir de las horas de funcionamiento y la potencia instalada. Esto se debe a que el consumo eléctrico de los remotes depende de la carga. La carga va cambiando cada vez que pasa una silla. Por ejemplo: no tendrá la misma carga un día de mucha afluencia de esquiadores que uno de poca. Del mismo modo, la carga variará en función del número de personas que transporte un telesilla dado.

El factor de carga es una variable muy importante que es considerada en el modelo LEAP-Baqueira. El factor de carga (fc), es una variable adimensional y para determinar su valor en el escenario de partida, se considera la expresión (3.2) :

$$fc = \frac{\text{consumo energético real} \left[\frac{kWh}{\text{año}} \right]}{\text{consumo energético teórico} \left[\frac{kWh}{\text{año}} \right]} \quad (3.2)$$

El consumo energético teórico de cada remonte [kWh], se calcula multiplicando las horas de funcionamiento de cada remonte por la potencia eléctrica instalada en el mismo, como indica la ecuación (3.3).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético teórico} [kWh] \\ &= \text{Horas funcionamiento} [h] * \text{Potencia Instalada} [kW] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Por otro lado, el consumo energético real, se calcula con la ecuación (3.4).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético real} [kWh] \\ &= \text{Horas funcionamiento} [h] * \text{Potencia Inst.} [kW] * fc \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.5.2. Producción de nieve

Existen tres puntos de producción de nieve. Esto se debe a que la estación tiene tres zonas bien diferenciadas: Baqueira, Beret y Bonaigua. Cada uno de estos sectores dispone de sus propios equipos necesarios para la producción de nieve. Para los casos de Baqueira y Beret, se han tomado los compresores y las salas de bombas por separado. Para el sector de Bonaigua, en cambio, se han agregado los compresores y bombas en una única tecnología, debido a que el consumo energético de este sector para la producción de nieve es mucho menor al de Baqueira o Beret. La Figura 3.6, muestra el mapa de las zonas donde se produce nieve artificial.

Al igual que en el anterior apartado, el consumo energético de cada tecnología empleada para la producción de nieve (compresores y salas de bombas), se calcula con el producto de las horas de funcionamiento de cada tecnología de producción de nieve por la potencia eléctrica instalada en la misma, como se indica en la ecuación (3.5).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético}_{\text{equipo}} [kWh] \\ &= \text{Horas func.}_{\text{equipo}} [h] * \text{Potencia Inst.}_{\text{equipo}} [kW] \end{aligned} \quad (3.5)$$

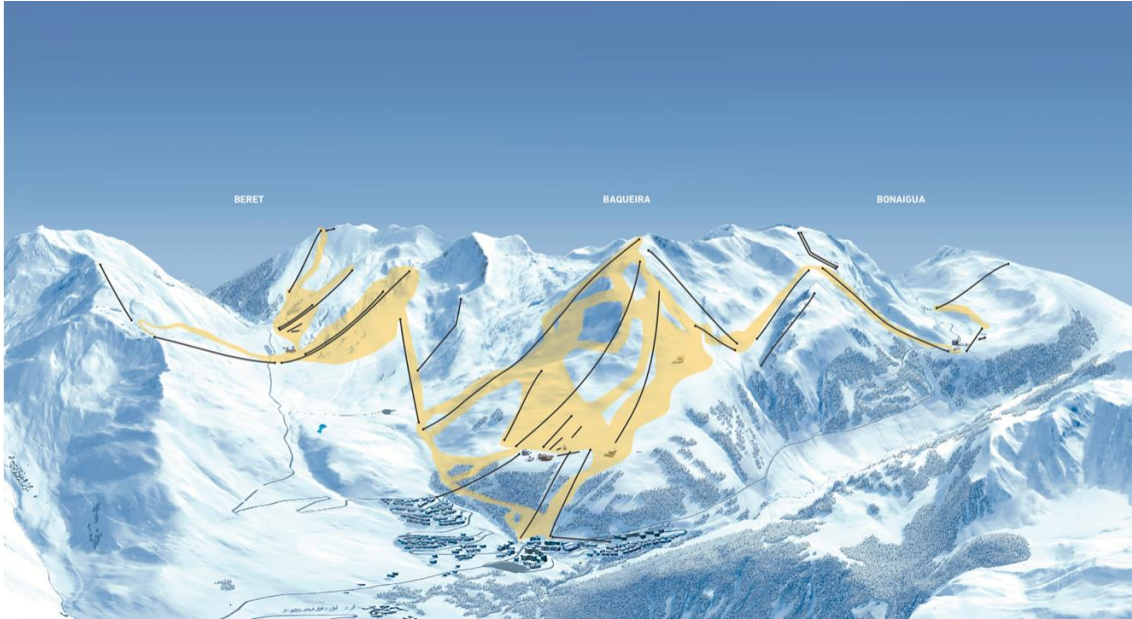


Figura 3.6: Mapa de las zonas de producción de nieve artificial (Fuente: Baqueira Beret)

3.5.3. Cafeterías

Lo mismo ocurre para el caso de las cafeterías. El consumo energético de cada cafetería, se calcula con el producto de las horas de funcionamiento de cada cafetería por la potencia eléctrica instalada en la misma, como indica la ecuación (3.6).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético}_{\text{cafetería}} [\text{kWh}] \\ &= \text{Horas func.}_{\text{cafetería}} [h] * \text{Pot. Inst.}_{\text{cafetería}} [\text{kW}] \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.5.4. Aparcamiento Ruda

El aparcamiento de Ruda es el más grande de la estación y el único subterráneo. Es por ello que su consumo eléctrico destaca frente a los demás aparcamientos al aire libre, que no tienen consumo alguno. Su consumo energético se calcula también multiplicando las horas de funcionamiento del mismo por la potencia instalada, tal y como aparece en la ecuación (3.7).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético}_{\text{aparcamiento}} [\text{kWh}] \\ &= \text{Horas func.}_{\text{aparcamiento}} [h] * \text{Pot. Inst.}_{\text{aparcamiento}} [\text{kW}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.5.5. Resto

Este apartado, agrupa los servicios de alquiler de esquís, las oficinas de la estación, en el núcleo 1500, el aparcamiento bajo la telecabina de Baqueira, servicios externos y otros servicios. Cada uno de estos servicios se corresponde con una tecnología consumidora de electricidad. Por ello, el cálculo se vuelve a repetir puesto que el consumo depende de las horas de funcionamiento y también de la potencia total instalada en cada caso. Se calcula con la ecuación (3.8).

$$\text{Consumo energético}_i [\text{kWh}] = \text{Horas func.}_i [h] * \text{Potencia Inst.}_i [\text{kW}] \quad (3.8)$$

3.5.6. Instalaciones

El gasto energético de las instalaciones se calcula a partir del consumo de combustible. En cada caso el consumo viene determinado en litros para un combustible dado. Se han tomado diferentes

tecnologías dependiendo del sector y del combustible en cuestión, tal y como muestra la Figura 3.7. A la hora de realizar los cálculos es el propio programa quien puede expresar el resultado final en diferentes unidades de energía, por lo tanto no es necesario realizar ninguna operación, únicamente se deberá indicar el consumo en litros de dicho combustible.

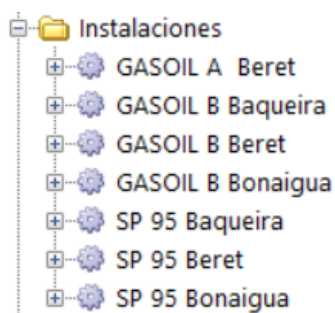


Figura 3.7: Árbol de la demanda de instalaciones

3.5.7. Pistas

Para el caso del gasto energético del servicio de pistas se han tenido en cuenta los tres tipos de combustibles empleados en las pistas convencionales y además, la gasolina sin plomo 95 utilizada en los servicios del *Snowpark*, como indica la Figura 3.8. Cada tecnología tiene asociada una variable que indica su consumo anual del combustible dado en litros.

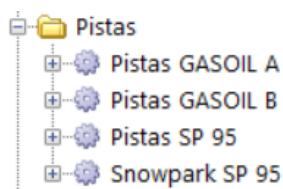


Figura 3.8: Árbol de la demanda de instalaciones

3.5.8. Vehículos

La modelización del parque vehicular mediante LEAP se ha realizado mediante una metodología *bottom-up* y con un alto nivel de desagregación considerando las diferentes tipologías de vehículos, su uso, funcionamiento, consumo etc. La naturaleza *bottom-up* del modelo permitirá evaluar el impacto de políticas energéticas en el consumo de energía del parque vehicular además de poder trazar escenarios de futuro en base a diferentes hipótesis. La profundización a la que se ha podido llegar en la modelización de esta rama de la demanda se debe, principalmente, al acceso a datos suficientemente representativos del parque vehicular de Baqueira S.A.

3.5.8.1. Máquinas pisanieves

Las máquinas pisanieves utilizan toda combustible fósil del tipo gasoil B. Este gasoil, se usa para maquinaria agrícola, industrial, pesquera, embarcaciones y vehículos autorizados. Está menos filtrado y contiene más parafina que el gasóleo A, con lo que puede generar problemas en el mantenimiento en coches y motos. Además su uso fuera del ámbito indicado está considerado como un delito de fraude o estafa a la Hacienda Pública ya que se estarían evitando los impuestos estatales a pagar si se tratase de gasóleo A.

Para calcular su consumo energético es necesario caracterizar algunas variables: el stock total de máquinas pisanieves, el horómetro de cada una de ellas (horas de funcionamiento de toda la temporada) y el consumo energético específico (*SEC*, por sus siglas en inglés). El stock de máquinas pisanieves se obtiene a partir de los datos facilitados por los propios ingenieros de Baqueira, al igual que las horas de funcionamiento de toda la temporada. Conociendo el consumo anual de combustible y las horas de funcionamiento de las máquinas se deduce el consumo en litros/hora a partir de la ecuación (3.9).

$$\text{Consumo} \left[\frac{l}{h} \right] = \frac{\text{consumo anual combustible} [l]}{\text{horas funcionamiento temporada} [h]} \quad (3.9)$$

El consumo específico de energía, se calcula multiplicando el consumo en litros/hora por el poder calorífico del gasoil. De esta manera, se obtiene el *SEC* en MJ/h.

A diferencia de otros vehículos que se recogen a continuación, el horámetro indica el consumo en litros por hora de funcionamiento. Posteriormente, se realiza la conversión de litros de diésel a MJ con la ecuación (3.10).

$$\begin{aligned} & \text{Consumo energético} [MJ] \\ &= \text{stock}_{\text{pisanieves}} * \text{horámetro}_{\text{pisanieves}} \left[\frac{h}{\text{año}} \right] \\ & * \text{sec}_{\text{pisanieves}} \left[\frac{MJ}{h} \right] \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.5.8.2. Vehículos de obra

Los vehículos de obra se dividen en tres grupos en función del combustible que utilizan: gasoil de automoción A, gasoil de automoción B y gasolina sin plomo 95. Cada equipo, tiene asociada una variable con su consumo anual en litros del combustible en cuestión, en el módulo *Key Assumptions*.

3.5.8.3. Vehículos de transporte

Los vehículos de transporte se agrupan en cuatro tipos: todoterrenos, furgonetas, camiones y motos de nieve. Esta agrupación se hace en función del tipo de vehículo, tamaño, kilometraje y consumo del mismo. En este caso, para el cálculo del consumo energético se multiplican el kilometraje del vehículo y la el consumo energético específico. El *sec* (*specific energy consumption*) se calculará multiplicando el poder calorífico (en MJ) del combustible fósil correspondiente (gasoil o gasolina) por el consumo en litros/km. El consumo de cada vehículo se ha determinado a partir de los datos ofrecidos por el fabricante. Los fabricantes de vehículos suelen proporcionar tres consumos para un vehículo dado: consumo urbano, consumo extra urbano y consumo mixto (o combinado). Debido a que la comarca del Valle de Arán es un territorio montañoso y de carácter rural, se ha tomado el consumo urbano para todos los vehículos, puesto que se asemeja en mayor medida al consumo real, siendo éste mayor que el consumo extraurbano. Finalmente se considera un *on-road factor* (para representar el incremento entre los consumos reales y los proporcionados por el test europeo).

El *on-road factor* utilizado es el mismo que se utiliza en Andorra debido a su similitud orográfica, elevaciones, altitud etc. El *on road factor* (ORF) de Andorra fue estimado a través de un estudio en el que se caracteriza una ruta del país y se simula el comportamiento energético de diferentes vehículos tanto térmicos como eléctricos (Traveset-Baro 2017). Los resultados cuantifican la diferencia de consumo energético de los turismos entre el test de certificación europeo NEDC (*New European Driving Cycle*) y las condiciones reales de circulación en Andorra en un 39,6 % y un 27,6% para vehículos térmicos y eléctricos respectivamente (Traveset-Baro et al. 2015). Se trata, por tanto, de un porcentaje importante a tener en cuenta para poder modelizar de manera precisa el parque vehicular. La ecuación (3.11) muestra el cálculo del consumo energético.

$$\text{Consumo energético [MJ]} = \sum \text{kilometraje}_{\text{vehículo}} \left[\frac{\text{km}}{\text{año}} \right] * \text{sec}_{\text{vehículo}} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{km}} \right] * \text{ORF} \quad (3.11)$$

3.5.8.4. Taller

La maquinaria utilizada en el taller funciona con gasoil B o gasolina sin plomo 95. Como existen muchos dispositivos de diferentes tipologías, consumos, horas de funcionamiento etc., se han agrupado todos los grupos, correspondiéndose a los dos tipos de combustibles utilizados. Como variable, se establece el consumo anual de combustible en el módulo *Key Assumptions* del modelo LEAP-Baqueira.

3.5.9. Validación con datos reales

Para llevar a cabo la validación con datos reales, se tendrán en cuenta dos grupos generales, por un lado los procesos que consumen energía eléctrica y por otro, los equipos y servicios que consumen combustibles.

Los procesos productivos-auxiliares dependen de la electricidad. Actualmente, la empresa dispone de un punto de suministro contratado. La Tabla 3.5, extraída de la auditoría energética realizada para la temporada 2015-2016, muestra el consumo eléctrico de los diferentes procesos productivos-auxiliares así como el porcentaje que le corresponde del total, el porcentaje acumulado y el importe en euros de cada proceso.

PROCESO PRODUCTIVO-AUXILIARES	kWh/año	%
Remontes	3.850.000	32,0%
Producción nieve Baqueira	2.883.301	23,9%
Resto (Oficinas, alquileres, servicios, etc.)	2.091.374	17,4%
Producción nieve Beret	1.698.734	14,1%
Cafeterías	736.040	6,1%
Producción nieve Bonaigua	360.000	3,0%
Parking Ruda	269.012	2,2%
Total Productivo-Auxiliares	11.888.460	98,7%

Tabla 3.5: Datos reales de consumo eléctrico (Fuente: Auditoría energética)

A continuación, se muestra la Tabla 3.6, muy similar a la anterior pero con los datos obtenidos en el modelo LEAP-Baqueira. Estos datos son los empleados en las *Current Accounts* y por tanto, a partir de ellos se crearán los diferentes escenarios de futuro.

PROCESO PRODUCTIVO-AUXILIARES	kWh/año	%
Remontes	3.849.990	32,0%
Producción nieve Baqueira	2.883.301	23,9%
Resto (Oficinas, alquileres, servicios, etc.)	2.091.374	17,4%
Producción nieve Beret	1.698.733	14,1%
Cafeterías	736.040	6,1%
Producción nieve Bonaigua	360.021	3,0%
Parking Ruda	269.012	2,2%
Total Productivo-Auxiliares	11.888.471	98,7%

Tabla 3.6: Datos obtenidos y utilizados en el modelo LEAP-Baqueira (Fuente: Elaboración propia a partir de la Auditoría Energética de Baqueira y los resultados obtenidos)

Como se puede apreciar al comparar ambas tablas, el error existente es despreciable puesto que en el peor de los casos, para el consumo de los remotes el error es del 0,012%. Este error se da básicamente por el redondeo que realiza el software LEAP cuando lleva a cabo las operaciones o por alguna pequeña incongruencia existente entre los datos facilitados por el departamento técnico de Baqueira-Beret.

La otra rama del análisis de demanda es el consumo térmico de los equipos. Este consumo térmico se recoge en la Tabla 3.7, extraída de la auditoría energética. Para caracterizar la demanda de combustibles en el modelo LEAP-Baqueira, se ha trabajado a partir de los datos facilitados por el departamento técnico de Baqueira. En este caso, los datos obtenidos con las hojas de cálculo e introducidos en el modelo, coinciden exactamente con los de la auditoría energética.

POR SERVICIO	Total litros/año
INSTALACIONES	3.658
VEHICULOS OBRA	37.753
VEHICULOS TRANSPORTE	94.079
TAL	651
MAQUINAS KASSBH	557.795
PISTAS BERET	31
PARKING 1.500	-
PISTAS	1.223
TOTAL	695.190

Tabla 3.7: Consumo de combustibles por servicio (Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Baqueira Beret)

Después de haber comprobado que los datos calculados y utilizados para caracterizar la demanda energética son correctos, se puede concluir que la validación con datos reales es buena y precisa.

3.6. Modelización del abastecimiento energético

Este apartado detalla la construcción del módulo de abastecimiento de energía del modelo LEAP-Baqueira. Debido a las características energéticas de Baqueira S.A., este apartado se dedicará únicamente a la modelización del abastecimiento eléctrico.

3.6.1. Introducción

LEAP modeliza el abastecimiento de energía mediante el módulo llamado *Transformation*. En su interior se simula la conversión y transporte de las diferentes formas de energía desde su origen hasta el punto de consumo. Este módulo está, a su vez, formado por otros módulos que representan los diferentes sectores encargados del suministro y conversión de energía tales como la generación y distribución eléctrica, la generación eléctrica a partir de la tecnología eólica o la tecnología solar fotovoltaica. Cada uno de los módulos contiene diferentes procesos, representando tecnologías individuales de producción o distribución (p.ej. centrales de generación eléctrica, red de distribución de electricidad) de una o más fuentes de energía.

Actualmente, Baqueira S.A. dispone de 12 puntos de suministro, como muestra la Tabla 3.8.

CUPS	Suministro	Tipo	Tarifa	Consumo anual (kWh)
ES0031405748648001MH	PISTAS	ELECT	6.1A	12.048.692
ES0031405748642001CK	HOTEL MONTARTO	ELECT	3.0A	739.349
ES0031405748649001AY	HOVASA (BUNGALOWS)	ELECT	3.0A	57.808
ES0031405993234011SA	DIAGONAL BARCELONA	ELECT	3.0A	18.087
ES0031405748393001GL	PLETA CASA 57	ELECT	3.0A	11.865
ES0031405748395001EH	PLETA CASA 59	ELECT	3.0A	8.074
ES0031405748394001WF	PLETA CASA 58	ELECT	3.0A	6.332
ES0031405814565046AY	EDIFICIO BONAIGUA	ELECT	3.0A	4.686
ES0031405746026061LD	SAUMET 13	ELECT	2.1A	24.378
ES0031405740503012YL	EDIFICIO ANETO (2F SUBT F)	ELECT	2.0A	4.661
ES0031405740503026FX	EDIFICIO ANETO (BAJO A)	ELECT	2.0A	4.661
ES0031405740503027FB	EDIFICIO ANETO (BAJO IZQ)	ELECT	2.0A	4.661

Tabla 3.8: Puntos de suministro de Baqueira S.A. (Fuente: Auditoría Energética Baqueira Beret)

De ellos el principal corresponde a la Estación de Esquí, este supera ampliamente el 85% del consumo global de la empresa, por lo que la presente Auditoría se centra únicamente en este punto de suministro (ES0031405748648001MH), con pequeñas aportaciones para el segundo consumidor que es el Hotel Montarto.

3.6.2. Energía eléctrica

3.6.2.1. Electricidad de la red

La modelización del abastecimiento eléctrico de un modelo LEAP clásico se realiza mediante dos módulos principales: (1) Distribución eléctrica representando las pérdidas en este proceso y (2) la Generación eléctrica. En el modelo LEAP-Baqueira únicamente se tendrá en cuenta la generación eléctrica puesto que al tomar la electricidad directamente desde el punto de suministro, las pérdidas por distribución son despreciables.

LEAP ofrece diferentes opciones de gestión de la generación eléctrica como fijar la aportación de cada tecnología, priorizar unas respecto a otras o utilizar las de menor coste en cada intervalo de tiempo. LEAP-Baqueira utiliza el criterio *Running Cost*, que prioriza las tecnologías con un menor coste de funcionamiento entre todas las disponibles en cada intervalo temporal.

En este caso, para la contabilización de las emisiones, se utiliza el factor de emisiones asociado a la energía eléctrica: el mix eléctrico.

El mix eléctrico es el valor que expresa las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de la electricidad que se consume, siendo así un indicador de las fuentes energéticas utilizadas para producir la electricidad. Cuanto más bajo es el mix, mayor es la contribución de fuentes energéticas bajas en carbono.

El mix de la red eléctrica peninsular de 2017 se estima en 392 g CO₂/kWh (Oficina Catalana del Canvi Climàtic 2018)

3.6.2.2. *Energía eólica*

La energía eólica es la energía producida por el viento. Fue una de las primeras fuentes de energía utilizadas por el hombre. En la actualidad existen sistemas para aprovechar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica mediante los aerogeneradores.

Esta fuente de energía presenta las ventajas e inconvenientes de la energía solar: es inagotable, limpia, no contaminante, y, una vez hecha la instalación para su captación, gratuita. Pero al mismo tiempo es dispersa, intermitente y se presenta de forma irregular en cuanto a su intensidad. Las principales aplicaciones de la energía eólica en aquellos lugares a los que llega el viento de forma irregular y con gran intensidad son:

1. **Aerobombas.** Para elevar el agua se usan ruedas de seis a quince álabes, que pueden bombear de quinientos a seiscientos litros por hora, cantidad suficiente para cubrir las necesidades de pequeñas explotaciones agrícolas.
2. **Producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores.** Para ello se instala una torre en cuya parte superior existe un rotor con múltiples palas que se orientan en la dirección del viento. Estos rotores actúan sobre un generador que permite obtener energía eléctrica.
 - a. **Aerogeneradores aislados:** se instalan en zonas aisladas en las que no se dispone de energía eléctrica. Pueden obtenerse potencias de diez a cien kW.
 - b. **Plantas eólicas:** están formadas por un cierto número de aerogeneradores, habiéndose alcanzado ya potencias unitarias cercanas a 2 MW. En la actualidad, para lograr un mayor aprovechamiento de la energía eólica, se están desarrollando modelos de equipos encaminados a la producción de energía eléctrica con un menor tamaño, una mayor duración y un mantenimiento más sencillo y barato, procurando mitigar el impacto ambiental producido por los aerogeneradores.

El caso de estudio que nos atañe se estudiará una combinación del punto 2 y el punto b. Es decir, producción de energía eléctrica mediante aerogeneradores en una planta eólica, ubicada en la estación de esquí.

La cordillera de los Pirineos es una de las zonas más ventosas del territorio catalán que, a gran escala, puede considerarse de las más adecuadas en términos de recurso eólico disponible para la implantación de parques eólicos en tierra (Margarit i Roset 2011). A su vez, esta área posiblemente requeriría de un adecuado dimensionamiento de las infraestructuras eléctricas de transporte y distribución, para la evacuación de la generación eléctrica asociada.

3.6.2.3. *Energía solar fotovoltaica*

La tecnología solar fotovoltaica es una opción muy a tener en cuenta para la introducción de energías renovable. Si bien es cierto que la zona pirenaica no se caracteriza precisamente por tener un gran potencial de generación solar fotovoltaica en comparación al resto del territorio español,

se trata de una posibilidad muy factible. Además, se trata de una de las principales energías empleadas en las estaciones de esquí que están tomando un rumbo hacia un futuro más sostenible.

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Esta transformación se consigue gracias a las propiedades de los materiales semiconductores de las células fotovoltaicas. El material base para la fabricación de paneles fotovoltaicos suele ser silicio. Cuando la luz del Sol (fotones) incide en una de las caras de la célula solar, genera una corriente eléctrica. Esta electricidad generada se puede aprovechar como fuente de energía (REN21 2018).

La principal aplicación de una instalación de energía solar fotovoltaica es la producción de energía eléctrica a partir de la radiación solar. La producción de energía puede ser a gran escala para el consumo en general o a pequeña escala para el consumo en pequeñas viviendas, refugios de montaña o sitios aislados.

Principalmente se diferencian 2 tipos de instalaciones fotovoltaicas:

- Instalaciones fotovoltaicas de conexión a red, donde la energía que se produce se utiliza íntegramente para la venta a la red eléctrica de distribución. El caso de estudio se trata de este tipo de instalación
- Instalaciones fotovoltaicas aisladas de red, que se utilizan para autoconsumo, ya sea una vivienda aislada, una estación repetidora de telecomunicación, bombeo de agua para riego, etc.

3.7. Recursos energéticos

El último paso en la modelización de un sistema energético en LEAP consiste en establecer cuáles de los recursos energéticos utilizados en el modelo son autóctonos y cuales importados. En este caso, Baqueira Beret S.A. no dispone de ningún recurso ni reserva propia. Esto supone que tenga que importarlos, como es el caso de la energía eléctrica que obtiene de la red y los combustibles fósiles.

La empresa Baqueira Beret tiene en la actualidad un punto de suministro energético contratado: electricidad.

La electricidad es el principal consumo energético tanto en el proceso propiamente productivo (remontes), como en servicios auxiliares (producción de nieve).

El suministro se realiza en alta tensión por parte de una comercializadora (Energya). La potencia contratada actualmente es, como se detalla en Tabla 3.9, de 5.003 kW en todos los periodos, excepto P6 con 8.000 kW, de la tarifa de acceso en alta tensión 6.1A.

Potencia contratada por periodos						
Periodos (tarifa de acceso 6.1ª)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Potencia contratada (kW)	5003	5003	5003	5003	5003	8000

Tabla 3.9: Potencia contratada por periodos (Fuente: Auditoría Energética)

3.8. 300 Escenarios considerados

Las secciones anteriores describen en detalle la modelización de la actual demanda energética de Baqueira Beret. Este apartado sirve como introducción a los escenarios considerados, que se explican detalladamente a continuación. Además aquí se recogen los datos y características más relevantes de los aspectos a tener en cuenta en el planteamiento de escenarios futuros.

Para elaborar los escenarios de futuro, se tomará como base el estudio (Pons et al. 2015) que trata la vulnerabilidad de las estaciones de esquí en los Pirineos debido a las variaciones inducidas en

el manto nival por el cambio climático. Este estudio proyecta la variación en la duración de la temporada de esquí para diferentes estaciones. Además, evalúa la capacidad de producción de nieve en escenarios futuros de variabilidad climática del manto nival.

Serán evaluados diferentes escenarios con el fin de analizar la vulnerabilidad de las estaciones de esquí del Pirineo para futuros cambios proyectados en el manto nival. Los cuatro primeros escenarios simulan un incremento de 2°C (equivalente a SRES B2 a final del siglo XXI) en un escenario de cambio climático moderado y los 4 segundos, un incremento de 4°C (equivalente a SRES A2 al final del siglo XXI) en un escenario de fuerte cambio climático. Todos estos cambios proyectados dan como resultado un comportamiento y evolución que se recogen en la Figura 3.9.

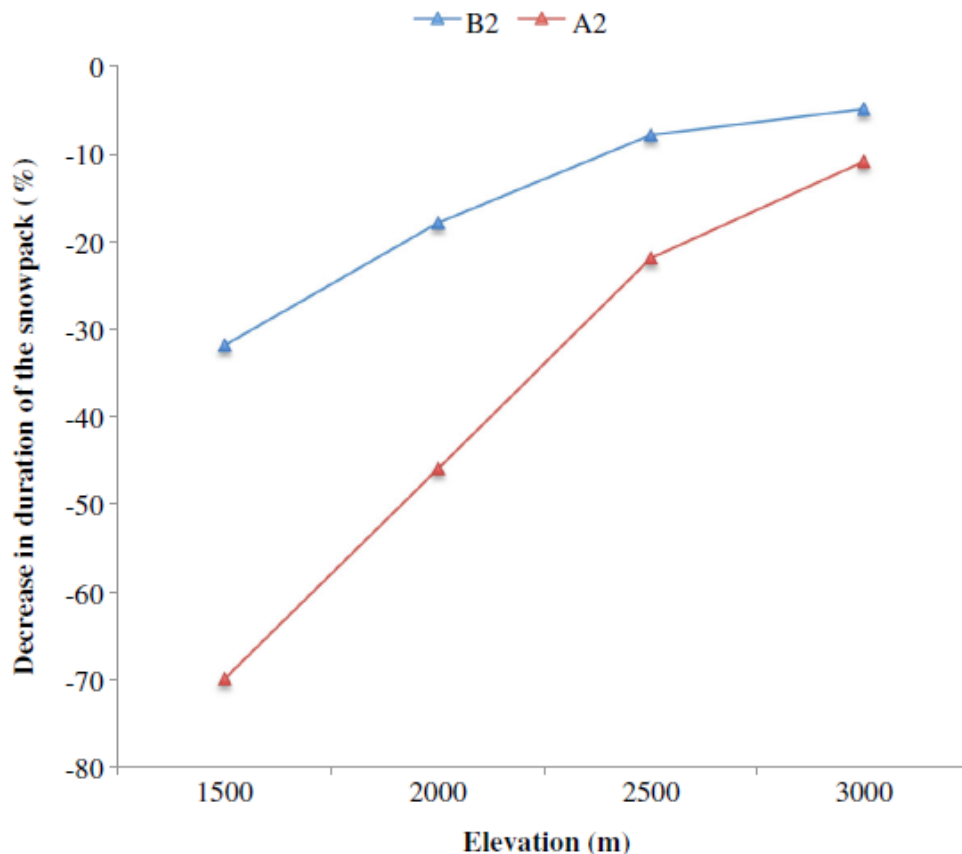


Figura 3.9: Cambios simulados en la duración del manto nival de acuerdo con los cambios climáticos proyectados por el modelo HIRH AM bajo SRES B2 (azul) y A2 (rojo) a diferentes planos altitudinales: 1500, 2000, 2500 y 3000m. (Fuente: (Pons et al. 2015), con permiso de los autores)

Otro de los pilares fundamentales en los que se sustentará la elaboración de escenarios e hipótesis futuras, es la Figura 3.10, que se obtiene como resultado de la proyección de cambios en el manto nival para las estaciones de esquí del Pirineo. Los recuadros indican la localización de Baqueira Beret en el Pirineo. Cabe destacar que en la Figura 3.10, aparecen estaciones del Pirineo catalán, francés y andorrano.

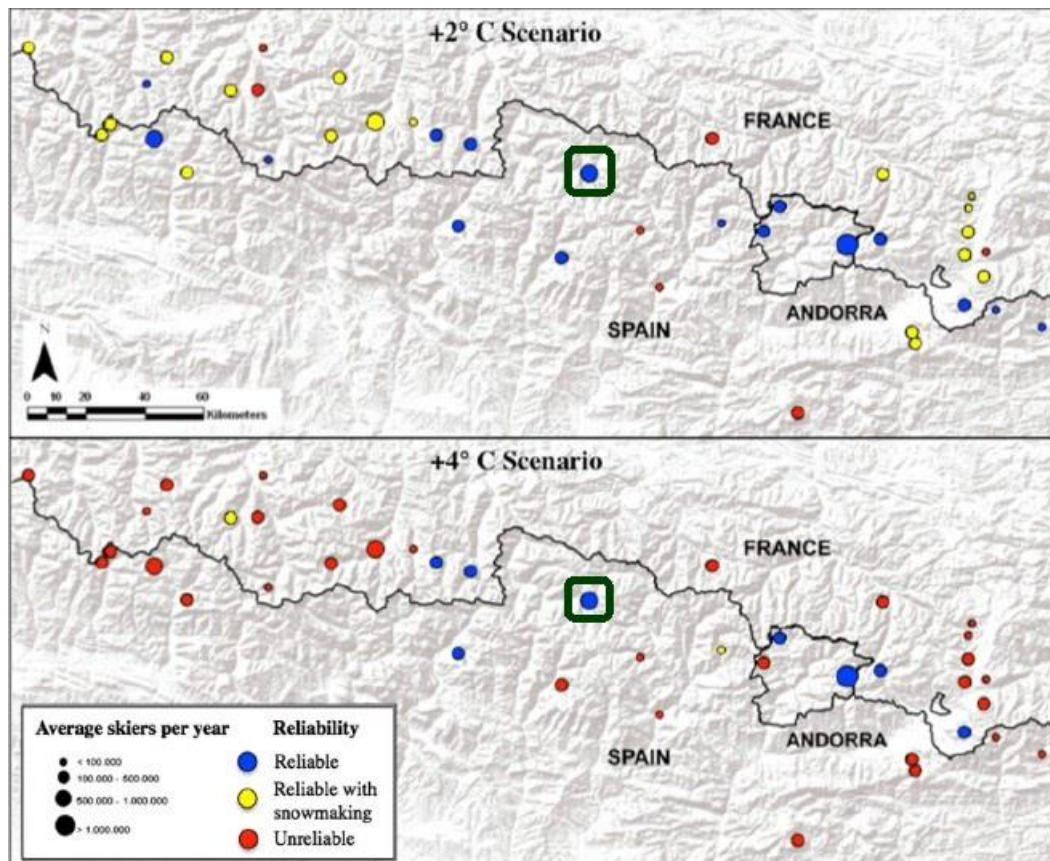


Figura 3.10: Confiabilidad de las estaciones de esquí del Pirineo considerando sólo nieve natural y nieve natural mejorada con sistemas de producción de nieve (confiabilidad técnica) en dos escenarios futuros de cambio climático: +2°C y +4°C. El tamaño de los puntos representa la media actual de asistencia en número de esquiadores durante el periodo de control (1961-1990). El recuadro muestra la ubicación de la estación Baqueira Beret. (Fuente: (Pons et al. 2015), con permiso de los autores)

Como se puede apreciar en la Figura 3.10, la estación objeto de estudio obtiene la calificación de confiable. Esto significa que se trata de una estación resiliente en la que se podrá seguir esquiando sin necesidad de recurrir a la producción de nieve artificial.

El citado artículo analiza la vulnerabilidad de las estaciones de esquí en los Pirineos debido a los cambios proyectados en el manto de nieve para varios escenarios climáticos futuros. Además, el estudio analiza la sostenibilidad de los sistemas de producción de nieve para compensar la variabilidad climática de la capa de nieve natural. En promedio, el estudio predice una duración de la temporada de esquí más corta, especialmente en estaciones de esquí de baja altitud en un escenario de cambio climático moderado y para todas las estaciones de esquí en otro escenario intensivo de cambio climático. Sin embargo, se ha identificado una variabilidad regional significativa para los impactos proyectados a distancias geográficas muy cortas dentro del área estudiada.

Los operadores de esquí necesitan un mínimo de 30cm de nieve compacta para poder abrir una pista de esquí. Actualmente, la producción de nieve artificial es la estrategia principal de adaptación usada para compensar la variabilidad natural de la nieve. Ayuda a garantizar un grosor mínimo de nieve, la apertura de la estación según el calendario, ingresos estables, pero además representa una estrategia e imagen comercial para alargar la temporada y así obtener mayores ingresos (Steiger and Mayer 2008).

Por tanto, para la elaboración de los escenarios de futuro se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

- Incremento de la temperatura en la superficie de la tierra: +2°C o +4°C
- Necesidad de producción de nieve artificial, en base a la resiliencia de la estación.
- Adaptación o no adaptación del comportamiento de los esquiadores
- Introducción o no de medidas de eficiencia energética y energías renovables.

De los cuatro primeros escenarios para +2°C, en dos de ellos se considerará una adaptación por parte de los esquiadores. En uno de ellos se tomarán medidas de eficiencia e introducción de renovables y en el otro no. Lo mismo ocurre para los otros dos escenarios +2°C de no adaptación, en uno de ellos se tomarán medidas de eficiencia y energía renovables y en el otro no. Los escenarios obtenidos se muestran a continuación en la Tabla 3.10.

Escenarios +2°C			
+2°C Adaptación		+2°C NO adaptación	
+2°C Adaptación NO Eficiente	+2°C Adaptación Eficiente	+2°C NO adaptación NO Eficiente	+2°C NO adaptación Eficiente
Escenario A (REFERENCIA)	Escenario B	Escenario C	Escenario D

Tabla 3.10: Tabla de los escenarios +2°C

Para los cuatro segundos escenarios correspondientes a +4°C, se toman en cuenta las mismas consideraciones obteniendo así los resultados de la Tabla 3.11.

Escenarios +4°C			
+4°C Adaptación		+4°C NO adaptación	
+4°C Adaptación NO Eficiente	+4°C Adaptación Eficiente	+4°C NO adaptación NO Eficiente	+4°C NO adaptación Eficiente
Escenario E	Escenario F	Escenario G	Escenario H

Tabla 3.11: Tabla de los escenarios +4°C

El escenario de referencia será diseñado como escenario base respecto al cual se cuantifican los impactos de las diferentes medidas o escenarios analizados. Para este estudio se considerará el Escenario A como escenario de referencia.

3.8.1. Producción de nieve

La nieve se produce creando una corriente de aire a gran velocidad que, unida a un caudal de agua que se lanza simultáneamente, produce una dispersión de ésta en pequeñas gotas. Al salir por el cañón, la temperatura debe ser de cero o menos grados, y con una humedad adecuada se consigue el mismo efecto que cuando cae la nieve de forma natural. Es una tecnología que funciona por compresión y considerada por los expertos un lujo energético por la gran cantidad de electricidad que precisa para los resultados deseados. La demanda de este tipo de equipos, que también son muy utilizados ya en otros destinos de esquí, como los Alpes, donde siempre había sobrado la nieve natural- ha hecho evolucionar la tecnología. Los cañones de ahora necesitan menos energía que los de hace unos años para funcionar y se trabaja en conseguir máquinas que puedan fabricar nieve por encima de los cero grados para hacer frente al aumento de las temperaturas.

Existen dos tipos de cañones de nieve en la estación de Baqueira Beret. En primer lugar están los TL6-10m con percha alta que operan a alta presión (HP). Estos cañones tienen un coste tanto en valor monetario como en valor energético de producción de nieve estimado para diferentes temperaturas (-2°C, -3°C, -4°C, -5°C, -6°C, -7°C y -8°C) y para diferentes presiones (20b, 30b, 40b y 50b). Por otro lado están los cañones TF10 de baja presión (BP) con ventilador. Éstos, también tienen un coste asociado. La metodología que se ha llevado a cabo es la de obtener el coste energético medio de producción en kWh/m³ de nieve, teniendo en cuenta todos los casos existentes. Se ha realizado la media de esta forma, puesto que las condiciones de temperatura y presión son extremadamente variables e imposibles de predecir. Con todo ello, se han obtenido los resultados de la Tabla 3.12:

Media HP kWh/m ³	Media BP kWh/m ³	Media Total (HP y BP) kWh/m ³
0,680588204	1,354785669	1,017686936

Tabla 3.12: Coste energético de producción de nieve de cañón

La Figura 3.11 muestra el modelo de cañón tipo percha TL6-10m y la Figura 3.12 muestra el cañón TF10 bajo y con ventilador.



Figura 3.11: Cañón de nieve TF10, de la casa Techno Alpin



Figura 3.12: Cañón TF10 de la marca Techno Alpin

3.8.1.1. Sector Baqueira

La Tabla 3.13 que se muestra a continuación, recoge algunas características de las pistas del sector Baqueira tales como la cota de salida, cota de llegada, ancho medio, superficie de la pista y la superficie de nieve producida.

Nombre	Cota salida (m)	Cota llegada (m)	Ancho medio (m)	Superficie pista (ha)	Superficie nieve producida (ha)
Baqueira	1.873,00	1.504,50	35	5,23	4,9
Esquirós	1.844,30	1.705,00	19	1,11	1,2
Tortuga	1.844,30	1.742,50	8	0,69	0,7
Pinarrets	1.770,00	1.735,00	20	0,18	1,1
Rabada	1.896,50	1.844,00	43	1,37	3,6
Era Cabana	2.037,10	1.842,30	35	5,76	4,2
Era Coma	2.037,10	1.842,30	39	4,27	3,9
Pastors	1.896,00	1.845,00	30	1,7	
Ta Orri	2.033,00	2.002,00	27	0,37	0,7
Mirador	2.447,00	1.842,40	55	14,34	10,3
Pla de Baqueira	2.200,00	1.857,00	50	7,43	5,9
Pla de Baqueira	2.202,00	1.860,00	56	13,18	6,8
Stadium	2.155,00	1.880,00	66	6,15	
Vista Ruda	2.197,00	1.866,00	50	7,18	
Luis Arias	2.464,00	1.900,00	31	6,5	6
Passarells	2.172,00	1.928,00	19	0,93	
Pales der Arias 1	2.384,00	2.212,00	32	1,3	

Pales der Arias 2	2.217,00	1.858,00	22	4,17	2
Guineu	2.440,00	2.291,00	29	1,75	
Cara Nord	2.472,00	1.851,00	41	14,7	11,2
Blanqueta	2.230,00	2.010,00	24	2,03	
Tubo Nere	2.281,00	2.114,00	26	0,89	
Isards	2.311,00	2.135,10	32	3,11	3
Perdiu Blanca	2.153,00	1.977,00	25	1,83	
Os	2.135,10	1.985,00	31	1,53	
Tamarro	2.135,10	2.004,00	35	1,74	1,8
Salida cara norte	2.084,00	1.938,00	15	1,34	
Horat deth Bò	1.923,00	1.831,00	18	1,76	1,3
Dera Cascada	1.850,00	1.504,50	25	5,77	4
Lebre	1.995,00	1.765,00	24	2,09	
Lenhadors	1.617,00	1.524,00	23	0,63	1,1
Ta Argulls	2.363,00	2.202,00	31	1,62	1
Ta Argulls	2.235,00	2.024,50	20	4,15	4
Audi Ski Kronos	2.220,00	2.151,00	24	0,63	
Antigua Solei	2.295,00	2.201,00	38	1,54	1,8
Deth Lac de Baciver	2.280,00	1.851,00	20	6,53	
Escornacrabes	2.458,00	1.903,00	20	8,9	
TOTAL	2.472,00	1.504,50		124,7	80,5

Tabla 3.13: Características de las pistas del sector Baqueira (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la estación)

El sector de Baqueira tiene su cota mínima situada a 1504,50 m de altitud, que se corresponde con el Núcleo 1500. Su cota máxima se sitúa a 2472 m de altitud, en el Cap de Baqueira. La superficie esquiable existente en el sector de Baqueira asciende a un total de 124,7 ha.

Por otro lado, el ancho medio de las pistas es de 30,76 m y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Ancho medio pistas [m]} = \frac{\sum_{i=1}^{n=37} \text{Ancho pista}_1 + \text{Ancho pista}_2 + \dots + \text{Ancho pista}_{37}}{n} \quad (3.12)$$

Para conocer el volumen de nieve existente en un sector concreto, tal y como indica la ecuación (3.13) es necesario multiplicar la superficie existente [m²] por el ancho medio de las pistas [m] de dicho sector. De esta forma se obtiene la cantidad total de nieve en el sector de Baqueira: 38357720 m³ de nieve.

$$Volumen\ nieve\ [m^3] = Sup.esquiable\ [m^2] * espesor\ nieve\ [m^2] \quad (3.13)$$

La densidad de la nieve de cañón es de 500 kg/m³. Si tenemos en cuenta que la densidad del agua a 4°C es de 1000 kg/m³, significa que por cada m³ de agua se obtienen 2 m³ de nieve de cañón. Es decir, la relación es de 1/2.

En la producción de nieve de cañón se estiman unas pérdidas de aproximadamente un 20% debido a que el viento transporta parte de esa nieve fuera de las pistas, hay una pérdida en el proceso de compactación, se da el fenómeno de evaporación etc.

Teniendo en cuenta todo esto, podemos calcular el volumen de agua necesaria para cubrir un volumen de nieve dado con la producción de nieve de cañón con la ecuación (3.14).

$$Agua\ necesaria\ [m^3] = \frac{Volumen\ de\ nieve\ [m^3] * \frac{1}{2}}{0,8} \quad (3.14)$$

Aplicando las ecuaciones anteriores obtenemos un volumen de agua necesaria para la producción de nieve de este sector de: 7.911.279,75 m³.

De acuerdo con la Figura 3.9 a una altitud de 1500 m, la reducción de la duración del manto nival es de aproximadamente, el 33%.

Sin embargo, cabría la posibilidad de considerar la cota mínima esquiable en el sector de Baqueira a 1800 m puesto que actualmente existen dos remontes: Telesilla del Bosque y Telecabina Baqueira que sirven como nexo entre las cotas 1500 y 1800. Esta consideración sería muy importante puesto que podría seguir utilizándose prácticamente todas las pistas del sector a excepción de una única pista denominada coloquialmente Vuelta a Casa, trayecto que podría suplirse con los dos remontes comentados anteriormente.

En este caso, a cota 1800, la reducción en la duración de la nieve sería de un 25%.

3.8.1.2. Sector Beret

La Tabla 3.14 que se muestra a continuación, recoge algunas características de las pistas del sector de Beret, tales como la cota de salida, cota de llegada, ancho medio, superficie de la pista y la superficie de nieve producida.

Nombre	Cota salida (m)	Cota llegada (m)	Ancho medio (m)	Superficie pista (ha)	Superficie nieve producida (ha)
Ta Beret 1	2.164,00	1.838,70	30	4,5	6,6
Ta Beret 2	2.154,00	1.840,00	31	4,57	5,9
Ta Beret 3	2.154,00	1.897,00	22	3,42	
Ta Beret 4	2.204,00	1.852,00	12	2,74	
Marmòtes	2.223,00	2.083,00	24	1,99	
Ta Baqueira	2.338,10	1.849,00	25	8,71	2,8
Torn de Baciver	2.326,00	2.156,00	20	2,38	
Vista Beret	2.158,00	1.851,00	33	7,64	7,2
Ta Dossau	2.338,10	1.975,00	26	5,37	0,4

Dera Reina	2.320,00	1.838,70	28	6,64	6,2
Dera Reina 2	2.271,00	1.838,00	24	4,55	
Pins	2.237,00	1.838,70	33	5,61	7,1
Stadium Fernández Ochoa	2.210,00	1.838,00	41	9,4	
Audeth	2.130,00	1.838,70	30	4,37	
Molins	2.204,00	1.838,00	30	6,44	
Pla de Beret	1.964,30	1.838,00	31	2,68	3,7
Pla de Beret bis	1.967,00	1.838,00	23	4,27	
Clot der Os	2.203,00	1.838,00	39	8,25	5
Cabanes	2.195,00	1.838,00	18	4,26	
Colhet de Marimanha	2.497,00	1.960,00	18	8,51	
Egua 1	2.491,20	2.256,00	28	2,05	
Egua 2	2.479,00	2.102,00	23	3,74	
Egua 3	2.442,00	2.145,00	27	3,27	
Dossau	2.504,00	1.949,00	39	9,5	5,9
Ticolet	2.504,00	2.014,00	26	5,48	1,8
Blanhiblar	2.219,50	1.838,70	29	6,78	6,9
Comalada	2.219,50	1.975,00	20	2,39	
Boarder Cross	1.998,00	1.876,00	36	2,56	
Pèira Arroja	2.216,00	1.873,00	20	3,24	
Roques d'en Macià	2.223,00	2.125,00	17	1,39	
Costarjàs	2.321,00	2.067,00	19	3,46	
Pales deth Mieï	2.222,00	1.914,00	18	2,93	
Arriu dera Serra	2.068,00	1.870,00	15	2,94	
Tuc deth Mieï	2.317,00	1.927,00	25	4,04	
Barlongueta	2.320,00	1.843,00	10	2,85	
Parròs	2.320,00	1.922,00	20	3,18	
Esmeligàs	2.291,00	1.923,00	26	3,54	
Saumet	2.377,00	1.969,00	20	2,81	
Sanglièr	2.377,00	2.155,00	17	1,41	
Gallina	2.169,00	1.873,00	17	2,36	
Paum	2.169,00	1.998,00	15	0,85	
Craba	2.384,00	1.998,00	19	3,35	
Orri de Tredòs	2.383,00	1.913,00	17	2,62	
Lacs deth Clòt der Os	2.338,00	2.112,00	30	1,92	
Total Beret	2.504,00	1.838,00		183,1	59,5

Tabla 3.14: Características de las pistas de Beret. Fuente: Baqueira Beret (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de Baqueira Beret)

El sector de Beret tiene su cota mínima situada a 1838 m de altitud, muy cerca del nacimiento del río Garona, de vertiente atlántica. Su cota máxima se sitúa a 2504 m de altitud, en el Cap de Dossau. La superficie esquiable existente en el sector de Beret asciende a un total de 183,1 ha.

Por otro lado, el ancho medio de las pistas es de 24,4 m y se calcula con la Ecuación (3.12).

Si seguimos la misma metodología aplicada en el apartado anterior, teniendo en cuenta el ancho medio de todas las pistas de este sector y la superficie total esquiable, podemos obtener los m³ de nieve que se han producido. Por último, con la ecuación (3.14) finalmente obtenemos que el agua necesaria para producir dicha nieve es de: 27.855.127,8 m³.

Como se puede observar en la anterior tabla, la cota mínima del sector de Beret es de 1838m, por tanto se tomará 1800 como la altitud mínima a la que habrá que asegurar la presencia de nieve para mantener operativas las pistas. Para este escenario de +2°C, la duración del manto nival se reducirá aproximadamente en un 25%.

3.8.1.3. Sector Bonaigua

La Tabla 3.15 que se muestra a continuación recoge algunas características de las pistas del sector Bonaigua tales como la cota de salida, cota de llegada, ancho medio, superficie de la pista y la superficie de nieve producida.

Nombre	Cota salida (m)	Cota llegada (m)	Ancho medio (m)	Superficie pista (ha)	Superficie nieve producida (ha)
Manaud	2.466,90	2.086,00	26	4,97	
Muguet	2.470,00	2.092,00	24	4,08	
Solei	2.445,40	2.146,00	25	3,94	
Argulls	2.340,00	2.046,00	24	5,08	
Argulls bis	2.335,00	2.076,00	37	5,61	
Lhastres dera Mina	2.389,60	2.289,00	14	1,05	
Barranc der Aire	2.384,00	2.180,00	23	1,51	
Costes de Ruda	2.384,00	2.041,00	23	4,28	
Teso dera Mina	2.365,00	2.052,00	16	3,03	
Cabirol	2.302,00	2.247,00	16	0,35	
Bonaigua	2.341,00	2.055,20	23	5,56	
Cresta de Bonaigua	2.323,00	2.123,00	14	1,88	
Pala del Teso	2.374,00	2.150,00	18	1,65	
Muntanyó	2.501,00	2.102,00	24	6,03	
Cigalera	2.502,00	2.194,00	18	2,95	
La Llança	2.501,00	2.300,00	25	4,1	
La Peüllà	2.323,00	1.909,00	23	4,5	

Les Paletes	2.323,00	1.995,00	8	1,02	
Bosc de la Peüllà	2.103,00	1.957,00	20	0,72	
La Pala Gran	2.300,00	1.993,00	25	2,38	
Gerber	2.257,00	1.936,00	26	2,55	
Pleta del Duc	2.323,00	1.909,80	22	7,74	
Pletiu d'Arnaldo	2.207,00	1.998,00	21	2,18	
La Perdiu	2.221,00	2.111,00	19	0,54	
Cap a Baqueira	2.137,00	2.072,00	16	1,06	
Del Riu	2.102,90	1.909,80	18	4,67	
Debutants	2.102,90	2.058,40	32	2,04	
Total Bonaigua	2.502,00	1.909,00		85,5	

Tabla 3.15: Características de las pistas de Bonaigua (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la estación)

El sector de Bonaigua tiene su cota mínima situada a 1909 m de altitud, en la estación inferior del telesilla de Peüllà, en la comarca del Pallars Sobirà. Su cota máxima se sitúa a 2502 m de altitud, en el Tuc de la Cigalera. La superficie esquiable existente en el sector de Bonaigua asciende a un total de 85,5 ha.

El sector de Bonaigua es un caso particular puesto que en la tabla no aparece la superficie de nieve producida. Sin embargo, tal y como se ha descrito en la rama de la demanda, sí existe un consumo asociado a la producción de nieve en este sector, que asciende a 360021 kWh anuales aproximadamente.

Si deseamos calcular la cantidad de nieve producida con dicha energía es necesario conocer la el requerimiento energético para la producción de un m³ de nieve. Sabiendo que de media se necesitan 1,0177 kWh/m³, se obtiene un volumen de 353.758 m³. Esto se traduce en 221.099 m³ de agua. Todas las cifras resultan bastante insignificantes en comparación a los otros dos sectores, puesto desde que en el momento que se caracterizó la demanda, se podía intuir la pequeña porción que suponía la producción de nieve en Bonaigua con respecto a toda la estación.

La cota mínima del sector de Bonaigua es de 1909 m, por tanto, tomaremos 1900 m como la cota mínima a la que habrá que asegurar la nieve para poder mantener las pistas operativas. A esta cota, y con el escenario de referencia +2°C, la reducción en la duración del manto nival será de un 22% según la Figura 3.9: Cambios simulados en la duración del manto nival de acuerdo con los cambios climáticos proyectados por el modelo HIRH AM bajo SRES B2 (azul) y A2 (rojo) a diferentes planos altitudinales: 1500, 2000, 2500 y 3000m

3.8.1.4. Producción de nieve para escenarios +4°C

En este apartado se llevará a cabo el cálculo de la producción de nieve necesaria para los escenarios de +4°C. Para la realización de los cálculos, se tendrán en cuenta los datos de la Tabla 3.16. En las columnas, de izquierda a derecha se indica: fecha, cobertura con condiciones naturales, confiabilidad con 30 cm, cobertura necesaria para llegar a los 30 cm, necesidad de producción de nieve, profundidad de nieve necesaria, potencial de producción de nieve para ese día, viabilidad técnica y la nieve a producir en metros (se utilizará para los cálculos).

A2 +4°C	Natural SC	Natural reliable 30cm	Snow Cover to 30 cm	Snowmaking need? (1=yes;2=no)	Snowmaking depth need	Potential Snowmaking days	Technical Reliable	Nieve a producir (m)
December 17	25,181	0	4,819	1	4,819	1	0	0
December 18	25,9165	0	4,0835	1	4,0835	1	0	0
December 19	27,3715	0	2,6285	1	2,6285	1	0	0
December 20	28,70925	0	1,29075	1	1,29075	1	1	0,0129075
December 21	29,7080833	0	0,29191667	0	0	1	0	0
December 22	29,9344167	0	0,06558333	0	0	1	0	0
December 23	30,4749167	1	-0,4749167	0	0	1	1	0
December 24	31,09125	1	-1,09125	0	0	1	1	0
March 13	29,5898333	0	0,41016667	0	0	1	0	0
March 14	29,0565	0	0,9435	0	0	1	0	0
March 15	28,22666667	0	1,773333333	1	1,773333333	1	1	0,01773333
March 16	28,45216667	0	1,547833333	1	1,547833333	1	1	0,01547833
March 17	28,03883333	0	1,9611666667	1	1,9611666667	1	1	0,01961167
March 18	27,43991667	0	2,560083333	1	2,560083333	1	1	0,02560083
March 19	27,37025	0	2,62975	1	2,62975	1	1	0,0262975
March 20	27,46625	0	2,53375	1	2,53375	1	1	0,0253375
March 21	26,6929167	0	3,307083333	1	3,307083333	1	0	0
March 22	26,2661667	0	3,733833333	1	3,733833333	1	0	0

Tabla 3.16: Producción de nieve para escenarios +4°C (Fuente: Comunicación personal con Marc Pons)

Una vez conocida la altura de nieve en metros necesaria, la producción total de nieve se obtiene utilizando la ecuación (3.13) con la superficie esquiable para cada uno de los 3 sectores. Una vez conocidos los m³ que deben producirse, se multiplica dicho valor por el coste en kWh/m³ de la Tabla 3.12 para obtener finalmente los kWh necesarios. Los resultados se muestran en la Tabla 3.17.

De la misma forma, se pueden obtener los metros cúbicos de agua utilizados para dicha producción, utilizando la ecuación (3.14).

	Baqueira	Beret	Bonaigua
m ³ nieve producidos	178.279,433	261.771,9667	122.236,5

kWh necesarios	181.432,6503	266.401,9107	124.398,4892
agua producida m ³	111.424,646	163.607,4792	76.397,8125

Tabla 3.17: Resultados obtenidos para la producción de nieve

Con estos datos, se puede deducir el aumento porcentual necesario en la producción de nieve para cada sector, teniendo en cuenta la energía actual destinada a la producción y la energía necesaria obtenida en la Tabla 3.17. De esta forma obtenemos los resultados de la Tabla 3.18.

Aumento producción de nieve	
Baqueira	6,29%
Beret	15,68%
Bonaigua	34,56%

Tabla 3.18: Aumento en la producción de nieve por sectores

3.8.2. Aumento de visitantes

Para intentar predecir cómo puede evolucionar el número de esquiadores que asisten anualmente a la estación de Baqueira Beret, las hipótesis se basarán en la tesis *Climate Change Impacts on Winter Tourism in the Pyrenees and Adaptation Strategies* (Pons Pons 2014). En esta, se combina un modelo de agentes con un modelo gravitacional que analiza el cambio en la distribución de los esquiadores debido a la respuesta individual al cambio climático. Es decir, debido a la adaptación en el tiempo y al comportamiento de cada esquiador como individuo.

Existen dos grupos diferentes de estaciones en cuanto a los patrones de asistencia se refiere. En primer lugar y para la mayoría de las estaciones ($\approx 70\%$) un ligero descenso, menor que un 25%, está proyectado para un escenario $+2^{\circ}\text{C}$ y un descenso significativo de entre el 50% y el 100% para el escenario $+4^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, solamente algunas estaciones son capaces de incrementar el número de visitantes en ambos escenarios, debido tanto a una menor vulnerabilidad climática como a una mayor atracción turística comparada a otros competidores.

Las proyecciones climáticas de la profundidad de la nieve en un futuro, la capacidad potencial de producción de nieve a la altitud media de la estación y la asistencia diaria de esquiadores en cada estación se usan como *input data* para el modelo gravitacional.

A continuación, la Figura 3.13 muestra el número de esquiadores esperados para una estación resiliente como Baqueira Beret para la situación actual y los escenarios futuros de $+2^{\circ}\text{C}$ y $+4^{\circ}\text{C}$.

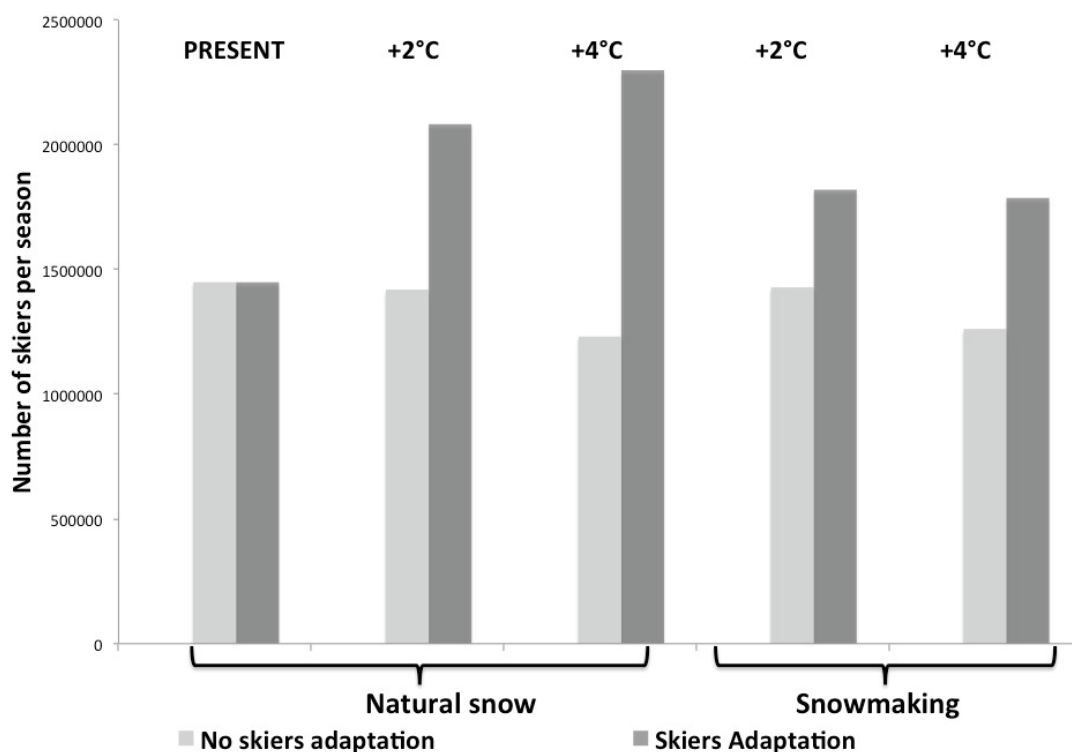


Figura 3.13: Asistencia anual de esquiadores en una estación de esquí resiliente para diferentes escenarios de cambio climático con y sin el comportamiento adaptacional de los esquiadores. (Fuente: (Pons et al. 2015), con permiso de los autores)

Sin embargo Baqueira Beret ha tenido una asistencia media de aproximadamente 9 millones de esquiadores anuales en los últimos 10 años.

Para el escenario +2°C Baqueira Beret no tendría la necesidad de producir nieve.

- No adaptación de los esquiadores: la asistencia se mantiene constante.
- Adaptación de los esquiadores: la asistencia aumenta aproximadamente 44,83%.

Para los escenarios +4°C produciendo nieve:

- No adaptación de los esquiadores: la asistencia se reduciría un 13,79%.
- Adaptación de los esquiadores: se daría un aumento del 20,69% aproximadamente.

A día de hoy no existen encuestas en el Pirineo que recojan el comportamiento adaptativo de los esquiadores ante situaciones de malas condiciones de nieve o cierre de estaciones. Esto hace que sea imposible prever el comportamiento de los esquiadores en un futuro. Como este comportamiento y adaptación dependen del potencial espacial, temporal y de actividad, de cara al futuro sería necesario realizar una encuesta que reúna información sobre las conductas de origen, viaje y estación de esquí frecuentada.

Este incremento de asistencia tiene consecuencias a nivel energético. Supondrá un mayor gasto energético a todos los niveles de demanda: cafeterías, servicios, vehículos de transporte y obra etc. Sin embargo, debido a la complejidad que entraña conocer el aumento del consumo energético en ramas como las cafeterías y servicios, estas ramas de la demanda no se tendrán en cuenta y se mantendrán constantes. Se considerará únicamente el efecto que pueda tener en la rama de los remontes. Como se ha comentado en el apartado 3.5.1.1, el factor de carga puede ir variando dependiendo de varios factores, entre los cuales se encuentran la carga del telesilla, las personas transportadas y la velocidad del remonte.

Por ello, se puede correlacionar un aumento de los esquiadores, directamente con un aumento en el factor de carga de los remontes. Éste nuevo factor de carga aumentará haciendo que también aumente el consumo energético de un remonte dado.

3.8.3. Medidas de eficiencia energética

3.8.3.1. *Todoterrenos eléctricos*

En la actualidad los todoterrenos ocupan un alto porcentaje del total de vehículos de transporte. Tal y como muestra la Figura 3.14 supone un 61,8% de todo el parque vehicular destinado al transporte.

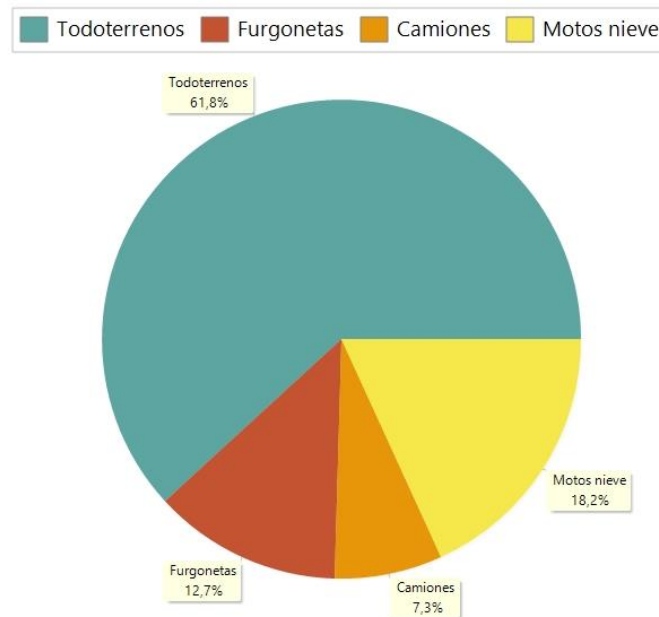


Figura 3.14: Porcentaje de cada tipo de vehículo de transporte

Además, es el grupo de vehículos que más energía consume, con un total de 2.677.200 MJ anuales, como indica la Figura 3.15.

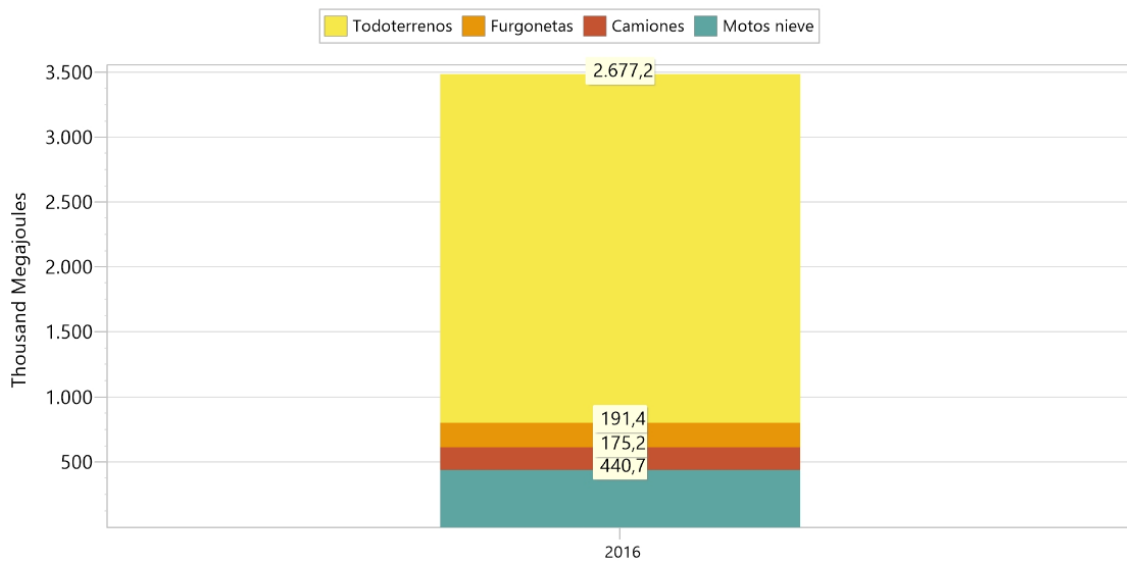


Figura 3.15: Consumo energético de los diferentes vehículos de transporte

Es por ello que conviene actuar en esta línea y proponer un cambio hacia todoterrenos que no utilicen combustibles fósiles sino electricidad como fuente energética.

La propuesta consiste en ir cambiando progresivamente los todoterrenos existentes en el parque vehicular por el todoterreno *Bollinger B1*.¹⁹

El *Bollinger B1* es un todoterreno clásico con aspecto de vehículo militar como se puede apreciar en la Figura 3.16. Sus dimensiones son 3,8 metros de largo, 1,9 de ancho y 1,86 de alto, lo que le permite contar con una capacidad de carga trasera de casi 1.800 kilos de peso.



Figura 3.16: Todoterreno 100% eléctrico Bollinger B1

Cuenta con una potencia total de 360 CV gracias a los cuatro motores eléctricos que incorpora. Además, tiene una autonomía de 193 o 321 kilómetros, dependiendo de la opción batería de ion-

¹⁹<https://www.bollingermotors.com/>

litio que escogida (60 o 100 kWh). Con estas cifras, el Bollinger B1 es capaz de acelerar de 0 a 100 km/h en poco más de 4,5 segundos y alcanzar una velocidad punta de 204 km/h.

Para caracterizar la demanda energética de este vehículo en los escenarios de futuro, se tiene en cuenta el kilometraje que tendrán los todoterrenos y el consumo energético específico de 1,1196 MJ/km que es aproximadamente una tercera parte del consumo energético específico de los actuales todoterrenos (3,36258132 MJ/km). Esto confirma que además de utilizar una energía más limpia como es la electricidad, se trata de una tecnología más eficiente.

Por todo ello, se propone el cambio progresivo hacia este tipo de vehículo puesto que con las características que tiene (potencia, autonomía, aceleración, velocidad punta, capacidad de carga etc.) puede desenvolverse perfectamente por un territorio como es el Valle de Arán y obtener muy buenas prestaciones.

Este cambio progresivo consiste en introducir un 50% de este vehículo para el año 2035, que en 2050 el 75% sean todoterrenos eléctricos y que para el año 2075, lo sean el 100%.

3.8.3.2. *Sustitución de máquinas pisanieves*

Otra de las ramas de la demanda con mayor consumo energético son las máquinas pisanieves, como indica la Figura 3.17, ocupan un 30,1% del consumo energético total de la estación y 20.600 GJ tal y como aparece en la Figura 3.17.

La Estación e Baqueira Beret dispone de 17 máquinas pisanieves repartidas entre las 3 zonas de servicio (Baqueira-Beret-Bonaigua). De ellas 14 son KASSBOHRER PB 600 POLAR²⁰ y 3 PRINOTH LEITWOLT.²¹

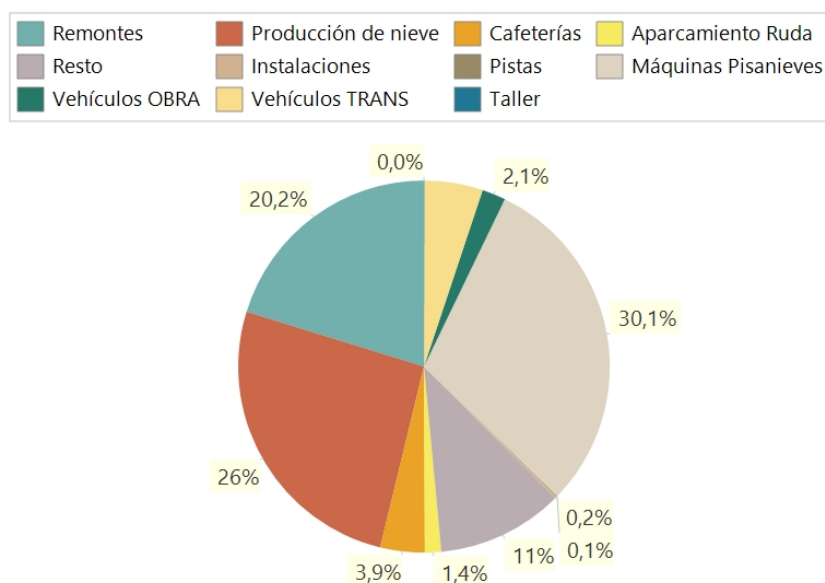


Figura 3.17: Porcentaje de consumo energético de las ramas de la demanda

²⁰ <https://www.pistenbully.com/deu/en/level-red.html>

²¹ <https://www.prinoth.com/es/>

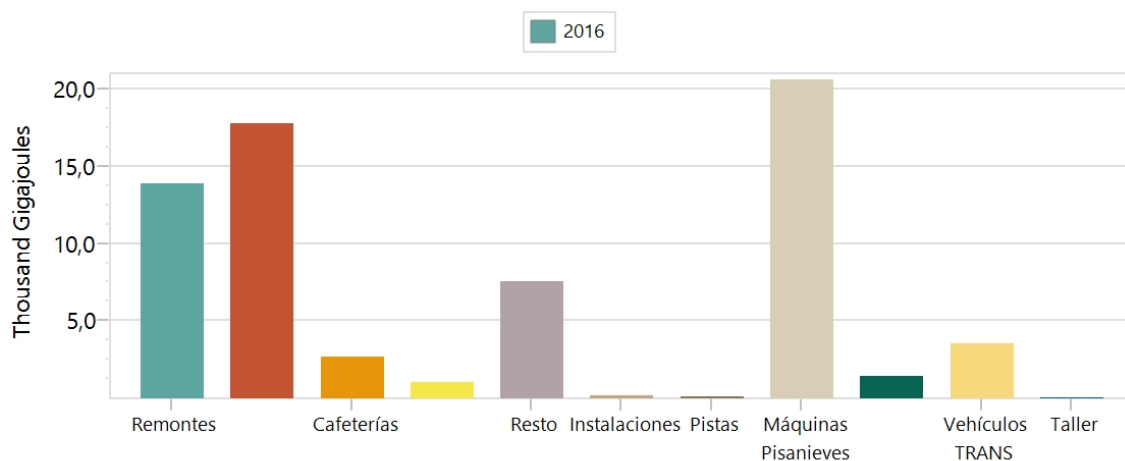


Figura 3.18: Consumo energético actual de las diferentes ramas, en millares de GJ.

Se adjunta la Tabla 3.19 con las especificaciones principales de las máquinas KASSBOHRER PB 600, mayoritarias en esta estación de esquí y la Figura 3.19 con una imagen del modelo dicho.

	PB 600W Polar
Anchura sin cadenas	2,50 m
Anchura sobre cadenas	4,20 m
Anchura con fresa	5,50 m
Altura con cabina horizontal	2,88 m
Altura con cabina inclinada	3,36 m
Longitud con fresa y pala niveladora	9,13 m
Plataforma de carga	2,25 m x 1,92 m
Peso con cadenas	9.945 kg
Peso total con equipos adicionales	12.500 kg
Carga máxima en plataforma de carga	1.500 kg
Velocidad progresiva	0-23 km/h
Potencia	490 CV
Presión específica sobre el suelo	0,069 kg/cm ²
Rendimiento por superficie con fresa	103.000 m ² /h
Consumo combustible aprox. desde	20 l/h
Capacidad depósito combustible	220 l

Tabla 3.19: Especificaciones principales de las máquinas KASSBOHRER PB 600



Figura 3.19: Kassbhörer PB 600W Polar

La medida consiste en la sustitución progresiva de las actuales máquinas pisanieves PB600 con motores de combustión alimentados por Gasoil por el modelo PB600E+, modelo impulsado por motores eléctricos, alimentados por un generador diésel, capaz de reducir el consumo y las emisiones en un 20% con respecto a sus predecesoras.

Esta Pisten Bully 600 E + de la Figura 3.20 está impulsada por dos motores eléctricos capaces de desarrollar 190 CV cada uno.²² Para alimentarlos eléctricamente cuenta con un motor diésel de seis cilindros, de la marca Mercedes-Benz, de 12,8 litros de cilindrada y capaz de entregar 400 CV con un consumo de gasoil contenido y con unas reducciones de óxidos nitrosos y CO₂ en torno al 20%.

²² <https://www.pistenbully.com/deu/en/vehicles/alpine/600-e.html>



Figura 3.20: Pisten Bully 600 E+

Además de unos menores costes operacionales por su menor consumo, el motor térmico funciona siempre en un rango óptimo de revoluciones, lo que reduce las averías y mantenimientos. La incorporación de estas máquinas Pisten Bully 600 E + también supone un ahorro en eficiencia, pues los motores eléctricos producen energía en las bajadas que es aprovechada para impulsar la caña del timón. Además al ser la transmisión de energía eléctrica más eficaz que la hidráulica permite a las máquinas tener más fuerza y ser capaces de operar en mayores pendientes. A continuación, la Tabla 3.20 muestra la comparativa entre los dos modelos de pisanieves.

	PB 600W Polar	PB 600E+
Anchura sin cadenas	2,50m	2,50m
Anchura sobre cadenas	4,20m	4,20m
Anchura con fresa	5,50m	5,50m
Altura con cabina horizontal	2,88m	2,88m
Altura con cabina inclinada	3,36m	3,36m
Longitud con fresa y pala niveladora	9,13m	9,13m
Plataforma de carga	2,25m x 1,92m	
Peso con cadenas	9.945kg	8.690kg
Peso total con equipos adicionales	12.500kg	12.500kg
Carga máxima en plataforma de carga	1.500kg	1.500kg
Velocidad progresiva	0-23km/h	0-20km/h
Potencia	490CV	400CV
Presión específica sobre el suelo	0,069kg/cm ²	
Rendimiento por superficie con fresa	103.000m ² /h	103.000m ² /h
Consumo combustible aprox. desde	20l/h	16l/h

Capacidad depósito combustible	220l	275l
Ratio l/m ² /h	0,000194175	0,00015534
% reducción del consumo específico		20%

Tabla 3.20: Comparativa entre PB 600W Polar y PB 600E+

La medida que se propone es ir cambiando las máquinas progresivamente de manera que en 2025, el 50% de las máquinas pisanieves sean PB 600E+, en 2035 lo sean un 75% y en 2050 lo sean el 100%. Esta es una medida que se propone a día de hoy después de haber valorado las opciones existentes. Esto significa que muy probablemente, en un futuro aparezcan nuevas máquinas y nuevas tecnologías aún más eficientes o incluso, máquinas que sean 100% eléctricas.

3.8.4. Introducción de energías renovables

Existen varias tecnologías que podrían incluir fuentes de energía renovables tales como la solar fotovoltaica o térmica, eólica, hidráulica, energía de biomasa etc. En este caso de estudio, debido a la situación, el contexto y el enorme consumo energético que tiene la estación de esquí, se estudiará el potencial de generación eléctrica con las tecnologías solar fotovoltaica y eólica. Teniendo en cuenta que Baqueira Beret S.A. es una empresa privada, la caldera de biomasa se ha descartado porque el consumo de gas de la actual caldera es prácticamente nulo. Por otro lado, se ha descartado la minihidráulica debido a que el recurso hídrico es propiedad el Ayuntamiento y mediante una concesión, es la empresa privada Endesa quien lo gestiona, pagando un canon.

3.8.4.1. Energía fotovoltaica

Para el caso de estudio, concretamente, se analiza la posibilidad de introducir la tecnología de paneles solares fotovoltaicos para poder captar la radiación solar y generar energía a partir del sistema de paneles y células fotovoltaicas.

Para estudiar el potencial solar fotovoltaico de la estación de esquí se ha estudiado la posibilidad de aprovechar las cubiertas disponibles para poder instalar en ella los paneles. Para realizar el cálculo de manera simple y precisa, se han tenido en cuenta dos tipos de cubierta: horizontales e inclinadas.

- Cubiertas horizontales: En este grupo se incluyen todas las estaciones de salida, intermedias y de llegada de todos los remontes de la estación. Además, en este grupo también se incluyen las cubiertas de las casetas de los remontes, espacio destinado a guardar los telesillas y cafeterías con cubierta horizontal.
- Cubiertas inclinadas: En este grupo se incluyen aquellos edificios, cuya cubierta está inclinada y por tanto, sólo una parte de dicha cubierta será aprovechable para la instalación de paneles, puesto que la otra quedará a la sombra y por tanto, será desfavorable. Edificios de servicios, oficinas, torres de control y algunas cafeterías se considerarán en este grupo.

3.8.4.1.1. Cálculo del potencial eléctrico de las cubiertas de los remontes

Para calcular el potencial solar fotovoltaico que se puede obtener en la estación de esquí, se ha utilizado una herramienta desarrollada por JRC en el marco de la *European Commission* (European Commission). Se trata de un sistema de información geográfica capaz de estimar el potencial fotovoltaico de un punto concreto sobre el mapa. Es una herramienta relativamente sencilla en la que hay que determinar:

- la base de datos de la radiación solar
- el tipo de tecnología utilizada: panel de tipo cristalino con una eficiencia del 19,4%

- la potencia fotovoltaica pico instalada (inicialmente se tomará 1 kWp)
- las pérdidas del sistema: el valor de 14% viene dado por defecto
- la posición de montaje
- la inclinación y el azimuth en grados

La Figura 3.21 muestra la interfaz de la aplicación y los diferentes aspectos a determinar.

The screenshot shows the 'PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV' interface. It includes a header with a logo and a help icon. The main area contains several input fields and dropdown menus. On the left, there are labels for 'Solar radiation database*', 'PV technology*', 'Installed peak PV power [kWp]*', 'System loss [%]*', 'Fixed mounting options', 'Mounting position*', 'Slope [°]*', and 'Azimuth [°]*'. On the right, there are corresponding dropdown menus and input boxes. The 'Solar radiation database' is set to 'PVGIS-CMSAF'. The 'PV technology' is set to 'Crystalline silicon'. The 'Installed peak PV power' is set to '1'. The 'System loss' is set to '14'. Under 'Fixed mounting options', the 'Mounting position' is set to 'Free-standing'. The 'Slope' is set to '35' and the 'Azimuth' is set to '0'. There are also checkboxes for 'Optimize slope' (unchecked) and 'Optimize slope and azimuth' (checked).

Figura 3.21: Datos introducidos en la herramienta PVGIS (Fuente: http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP)

Para determinar la inclinación y el azimuth de los paneles existen varias posibilidades. Una de ellas es utilizar el criterio de $latitud + 10^\circ$ que optimiza la captación y la producción en los meses de invierno, al tener los paneles una mayor inclinación. A pesar de que esta opción parece la ideal se ha desestimado puesto que se pretende optimizar la generación en el cómputo global de un ejercicio. Si se tratase de una instalación para autoconsumo, probablemente sería la mejor opción. Sin embargo se trata de una instalación conectada a la red eléctrica. Además, como se estudiará a continuación, la generación de energía a partir de aerogeneradores alcanza su mayor nivel en los meses de invierno, mientras que la generación a partir de paneles fotovoltaicos tiene mayor rendimiento en los meses de verano. De este modo pueden complementarse ambas tecnologías.

La herramienta ofrece la opción de optimizar tanto la inclinación como el azimuth. Seleccionando la localización de la estación sobre los mapas del sistema de información geográfica, se obtiene una inclinación óptima de 35° .

Hay que tener en cuenta, que, al tratarse de cubiertas horizontales, los paneles deben estar dispuestos de forma que no se hagan sombra entre ellos. Para calcular la distancia que se debe dejar entre paneles hay que tener en cuenta el ángulo del panel sobre la horizontal.

Se ha utilizado una aplicación de Monsolar²³: Calculadora de separación entre paneles solares para evitar sombras (Monsolar). La Figura 3.22 muestra el esquema con la posición de los paneles, ángulos y distancias que determinarán su colocación en base a los datos introducidos como muestra la Figura 3.23. Con todo esto, se obtienen los resultados de la Figura 3.24.

²³ <https://www.monsolar.com/separacion-paneles-solares>

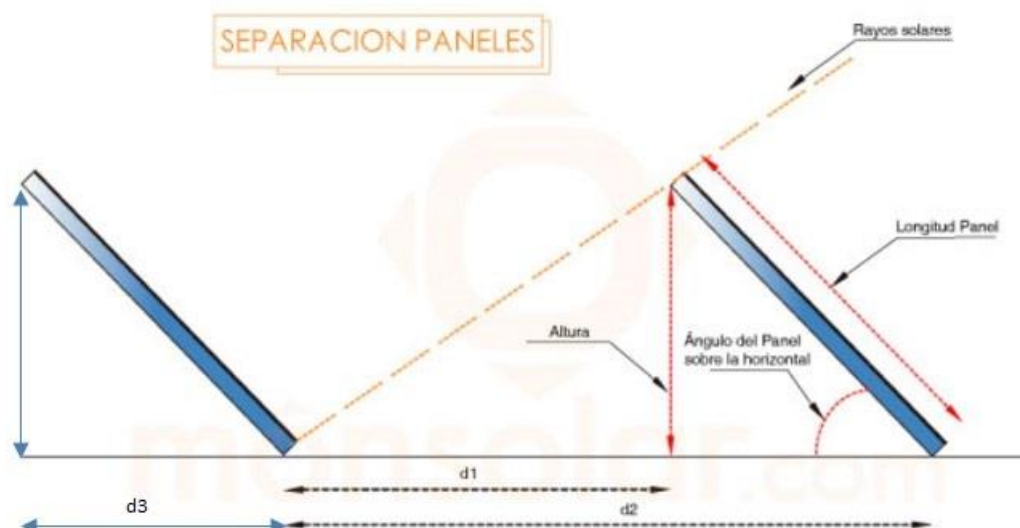


Figura 3.22: Separación para evitar sombras

Tipo de Tejado	Ángulo de inclinación tejado (Ángulos en positivo)	Latitud del lugar	Longitud del panel en metros	Ángulo del panel sobre la Horizontal
Horizontal	0	42.5	1.59	35

Figura 3.23: Datos a introducir en la Calculadora de sombras

d1 mínima	d1 Recomendada	d2 mínima	d2 Recomendada
2.048	2.560	3.351	4.189

Figura 3.24: Resultados obtenidos con la Calculadora de sombras.

El primer paso es calcular la superficie media que ocupará un panel. Para ello, se calculará la proyección horizontal del panel con la expresión (3.15)

$$d3 = \cos 35^\circ * 1,59 \quad (3.15)$$

Introduciendo el dato de 1,59 m de largo del panel, se obtiene una $d3 = 1,302$ m

A partir, de aquí habrá que calcular la distancia total necesaria para la colocación de dos paneles sumando la $d2$ recomendado y la $d3$ obtenida anteriormente. El área total necesaria para la colocación de un panel teniendo en cuenta la sombra que genera el colocado delante de él se calcula con la ecuación (3.16).

$$\text{Área de un panel} = \frac{(d2 + d3) * \text{ancho panel}}{2} \quad (3.16)$$

Tomando el ancho de panel 1,053 m el área necesaria para la instalación de un panel sin que se le haga sombra es de 2,89 m².

A partir de aquí, se ha calculado la superficie disponible en todas las cubiertas de las estaciones de salida, intermedias (si las hubiera), llegada y casetas de control con ayuda de la aplicación CalcMaps²⁴. En la Figura 3.1 se muestra el cálculo del área disponible en la estación inferior del telesilla desembagable Bonaigua. En este caso se toma el área de la cubierta de la caseta de control (1), de la estación propiamente dicha (2) y de la cubierta del espacio destinado a guardar los telesillas.

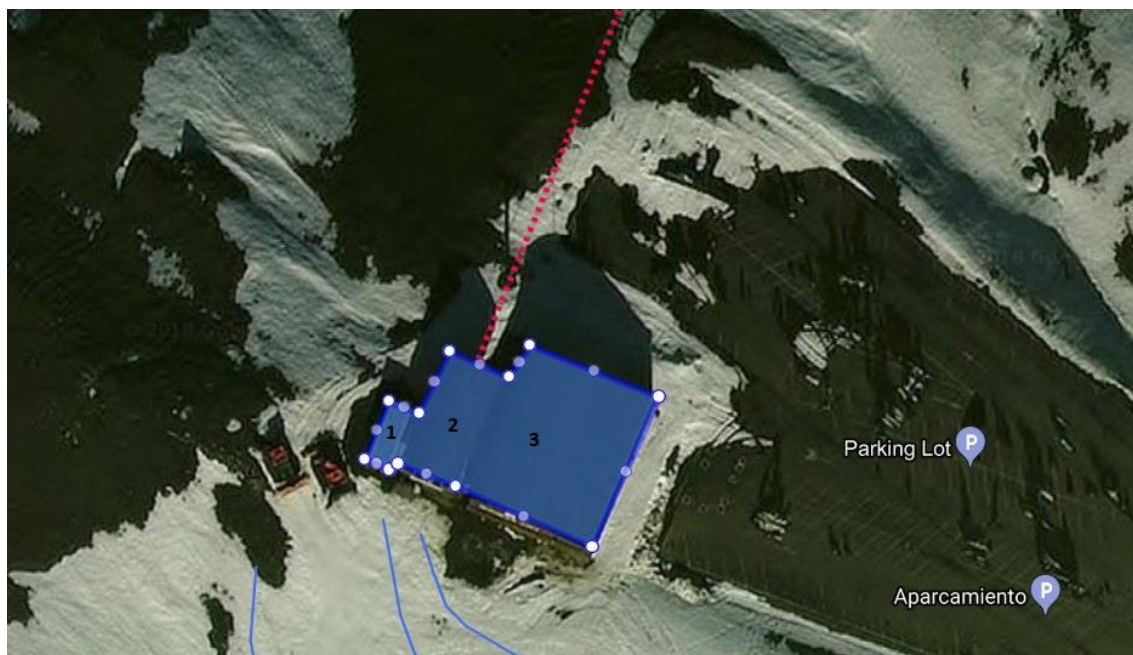


Figura 3.25: Cálculo del área para la estación inferior del Tsd. Bonaigua (Fuente: CalcMaps)

Realizando esta metodología para todas y cada una de las cubiertas disponibles de todos los remontes, se obtienen las siguientes superficies por sectores:

- Sector Baqueira: 3229 m²
- Sector Bonaigua: 2095 m²
- Sector Beret: 1164 m²

Para obtener el número total de paneles es necesario dividir la superficie total de la estación entre el área que ocupa un panel, tal como indica la expresión (3.17).

$$N^{\circ} \text{ Total paneles} = \frac{\text{Sup. Total estación (m}^2\text{)}}{\text{Área de un panel (m}^2\text{)}} \quad (3.17)$$

Número de paneles solares por sectores:

- Sector Baqueira: 1131 paneles
- Sector Beret: 397 paneles

²⁴ <https://www.calcmaps.com/>

- Sector Bonaigua: 715 paneles

El número total de paneles que podrían instalarse es de 2243. Para obtener la potencia instalada total (kWp) es necesario multiplicar el número total de paneles por la potencia de cada panel, como indica la ecuación (3.18).

$$Pot.Tot.Instalada (kWp) = N^{\circ} Total de paneles * Potencia del panel \quad (3.18)$$

POTENCIA INSTALADA	
Baqueira	367,575 kW
Beret	129,025 kW
Bonaigua	232,375 kW
total	728,975 kW

Tabla 3.21: Potencia instalada en las cubiertas de los remotes

Gracias a la aplicación PVGIS, podemos obtener el potencial de generación eléctrica (kWh/año) en cada cubierta estudiada. Como se ha explicado anteriormente, para calcular el potencial eléctrico se ha determinado una potencia instalada de 1 kWp. De esta forma para obtener la producción anual de cada punto estudiado, es necesario multiplicar el potencial de ese punto para 1kWp por la potencia total instalada en ese punto, como indica la ecuación (3.19).

$$Potencial de generación anual \left(\frac{kWh}{año} \right) = kWh/año_{1kWp} * Total kWp instalados \quad (3.19)$$

Finalmente, sumando el potencial de generación eléctrica anual de cada cubierta estudiada se obtiene un valor de **779.588,55 kWh/año** en este primer grupo asociado a los remotes. Esto supondría cubrir aproximadamente el 6,6% de consumo eléctrico actual. De este modo, la potencia instalada para este primer grupo de cubiertas es de 728,975 kW.

3.8.4.1.2. Cálculo del potencial eléctrico en edificios de la estación

Como se ha comentado anteriormente, el otro grupo de cubiertas en las que poder llevar a cabo la instalación de paneles solares fotovoltaicos lo conforman las cubiertas de los edificios de servicios, oficinas, torres de control y algunas cafeterías. Algunos de estos edificios tienen la cubierta horizontal y otros inclinada. Para simplificar el cálculo, se ha tomado una inclinación media de los tejados inclinados de 35° puesto que los tejados suelen tener una inclinación de entre 30° y 45°. Además, al tomar esta inclinación tipo, coincide con la inclinación óptima que deberían tener los paneles para maximizar la generación de energía.

La Figura 3.26 muestra la medición del área correspondiente a la cubierta de la Cafetería del Bosque y el Guardaesquí. Esta, junto con la Cafetería 2200 son los únicos edificios con cubierta horizontal. De este modo, para determinar el potencial total de generación eléctrica anual, basta con seguir la misma metodología empleada anteriormente en el caso de los remotes.

Entre las dos cafeterías y el guardaesquí, suman una superficie de 987m².



Figura 3.26: Área de la cubierta de la cafetería del Bosque y el Guardaesquís.

Todos los demás edificios son de cubierta inclinada. Esto hace que haya que seleccionar cuidadosamente la cubierta del edificio orientada al Sur, para maximizar la producción energética.

Como se puede apreciar en la Figura 3.27 existen dos tipos de inclinaciones. La inclinación tipo A es favorable para la separación entre filas de paneles en cambio, la inclinación tipo B desfavorable para la separación entre filas de paneles. En nuestro caso se han seleccionado únicamente las cubiertas con inclinación tipo A. Entre todos los tejados de este tipo, suman una superficie de 946m².

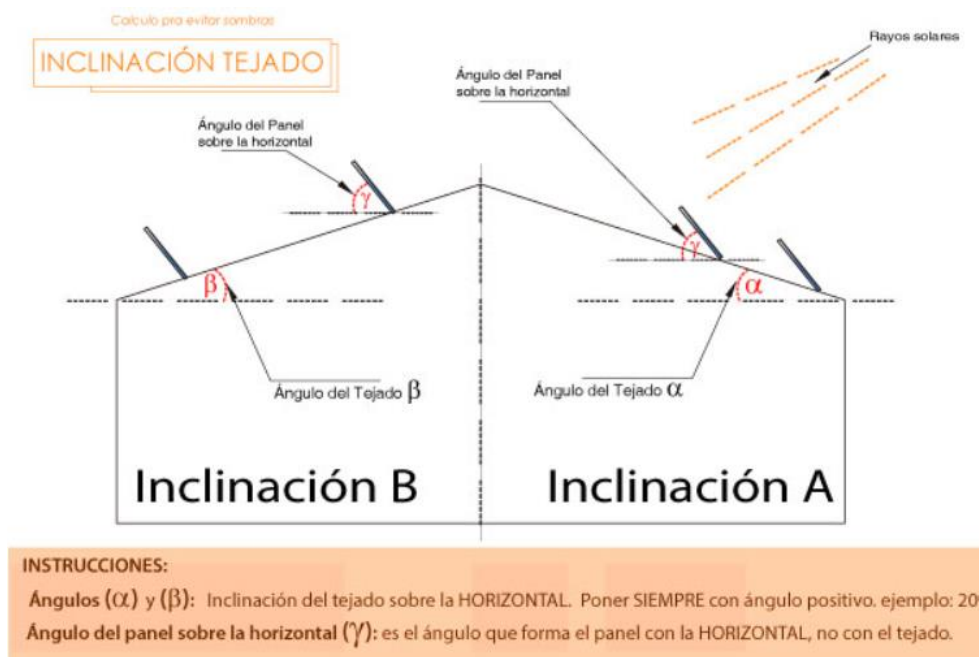


Figura 3.27: Esquema inclinación del tejado

La Figura 3.28 muestra los datos necesarios para el cálculo de las distancias entre paneles, de forma que no se hagan sombra entre sí. La Figura 3.29 muestra los resultados obtenidos para los datos introducidos previamente.

Tipo de Tejado	Ángulo de inclinación tejado (Ángulos en positivo)	Latitud del lugar	Longitud del panel en metros	Ángulo del panel sobre la Horizontal
Inclinación A	35	42.5	1.59	35

Figura 3.28: Datos a introducir para los tejados de inclinación A.

d1 mínima	d1 Recomendada	d2 mínima	d2 Recomendada
0.000	0.000	1.590	1.988

Figura 3.29: Resultados obtenidos para las cubiertas de inclinación A.

POTENCIA INSTALADA	
Cafeterías y guardaesquí con cubierta horizontal	110,5 kW
Resto de edificios	182,325 kW
Total	292.825 kW

Tabla 3.22: Potencias instaladas en cafeterías y resto de edificios

Por último sumando el potencial de generación eléctrica de las dos cafeterías con cubierta horizontal y el resto de edificios, se obtiene un valor de 344.929 kWh/año, lo que supone aproximadamente un 3% del actual consumo eléctrico. De esta forma se obtienen las potencias instaladas que se recogen en la Tabla 3.22.

La introducción de esta tecnología en el sistema eléctrico de la estación se llevará a cabo en cuatro fases.

1. Para el año 2030, instalación de paneles sobre las cubiertas de los remotes en el sector Baqueira: 367,575 kW
2. Para el año 2040, instalación de paneles sobre las cubiertas de los remotes del sector Bonaigua: 232,375 kW
3. Para el año 2050, instalación de paneles sobre las cubiertas de los remotes del sector Beret: 129,025 kW
4. Para el año 2060, instalación de paneles sobre las cubiertas de cafeterías y resto de edificios: 292,825 kW

3.8.4.1.3. Mantenimiento

El mantenimiento preventivo de instalaciones solares, puede llevarse a cabo por personal no especializado. En este caso, podrían llevarlo a cabo trabajadores de la estación, ya sean remonteros o de mantenimiento.

El mantenimiento del sistema de generación, es decir, de los paneles solares, consiste en retirar una vez al mes, cualquier tipo de objeto, suciedad que puedan afectar negativamente al funcionamiento. En nuestro caso será principalmente la nieve, aunque también pueda haber excrementos de ave.

Otros aspectos de mantenimiento a tener en cuenta son²⁵:

- Inspección visual de posibles degradaciones en los paneles fotovoltaicos
- Comprobación de la estructura soporte de los paneles
- Revisión del buen funcionamiento de los inversores

Existen casos especiales como el granizo y la nieve. Los paneles fotovoltaicos tienen una elevada durabilidad y resistencia, por ello, la probabilidad de que el impacto de granizo afecte negativamente a los paneles es mínima. Por otro lado, en zonas donde las nevadas se producen de manera periódica, es necesario que los paneles tengan una inclinación mayor a 15° para que la nieve no se acumule (SotySolar). Como los paneles tienen una inclinación de 35°, la nieve no se acumulará. Además, la nieve se derrite de forma rápida, hecho que favorece la limpieza de los paneles como si de un mantenimiento natural se tratase.

3.8.4.2. Energía eólica

En Cataluña, el Plan de espacios de interés natural (PEIN), aprobado en 1992, es el instrumento de planificación de nivel superior que estructura el sistema de espacios protegidos de Cataluña e integra este sistema dentro del conjunto del territorio, ya que el PEIN es un plan territorial sectorial encuadrado dentro del Plan territorial de Cataluña (1995) (Pereiro Olaizola 2016). En la Figura 3.30 se muestran los espacios protegidos en la comarca del Valle de Arán y un rectángulo granate, que muestra el emplazamiento de los aerogeneradores.



Figura 3.30: Zonas de protección oficial y ubicación del aerogenerador

Se ha determinado el emplazamiento en la zona del Cap de Baqueira (2492 m). Esto se debe a que en este punto confluye la llegada de varias telesillas como Pla de Baqueira, Manaud y Mirador. En esta zona se encuentra también la principal antena de telecomunicaciones y por tanto, ya existe un impacto visual previo, es decir, no se trata de una zona virgen. Además, forma parte del terreno de la estación y se encuentra fuera de los espacios naturales protegidos.

La elección de la turbina debe determinarse por un mejor aprovechamiento del recurso del emplazamiento, es decir, que la energía anual producida sea la mayor posible. Las turbinas eólicas modernas son equipos capaces de transformar, de forma eficiente, la energía cinética proveniente del viento en energía mecánica en un eje. El objetivo es, precisamente, aprovechar esta energía en sistemas de producción de electricidad.

Para conocer el potencial de recurso eólico disponible en la ubicación elegida, se ha utilizado una aplicación desarrollada por la empresa Enair²⁶, dedicada al sector de los aerogeneradores. Esta aplicación nos permite conocer la producción en kWh/día. Esta producción depende de la velocidad media del viento a la altura del buje. Esta velocidad determinará la potencia media a la

²⁵ <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/instalaciones-fotovoltaicas-tipos-de-mantenimiento/>

²⁶ <https://www.enair.es/es/app>

que trabajará el aerogenerador. Al tratarse de una aplicación desarrollada por la empresa Enair, que manufactura sus propios aerogeneradores, únicamente nos da la opción de realizar la simulación con uno de los modelos que Enair comercializa. Sin embargo, conociendo la velocidad media del viento en un punto concreto, podemos determinar la potencia a la que trabajará nuestro generador gracias a la curva de potencia de la Figura 3.31. Conocida la potencia, se puede realizar una regla de tres y determinar la producción diaria de electricidad en kWh/día en un determinado punto. Finalmente, para obtener la producción anual basta con multiplicar la producción diaria por 365.

Además se han considerado los siguientes aspectos:

- Rugosidad del terreno: campo abierto
- Altura sobre el suelo: 75 m
- Latitud: 42,692190
- Longitud: 0,974844
- Altitud: 2464,7 m

El atlas eólico nos indica:

- Velocidad media del viento a la altura del buje: 6,5 m/s
- Densidad del aire: 83,40%

Para este caso, se ha escogido el aerogenerador V52/850 del fabricante Vestas.

Los resultados obtenidos a partir de la aplicación Enair y realizando la regla de tres con los datos del aerogenerador Enair y el aerogenerador V52/850 son:

- Potencia media: 162 kW
- Energía: 3.884,61 kWh/día
- **Producción anual: 1.417.882,65 kWh/año**

Datos generales:

- Fabricante: Vestas (Dinamarca)²⁷
- Turbina eólica: V52/850
- Potencia: 850 kW
- Diámetro: 52 m
- Modelo antiguo
- Clase de viento: IEC I/II
- Compatible offshore: no
- Área de barrido: 2124 m²
- Densidad de potencia: 2,5 m²/kW
- Número de palas: 3
- Limitación de potencia: Pitch
- Puesta en servicio: 2000

²⁷ <https://www.vestas.com/>

Curva de potencia

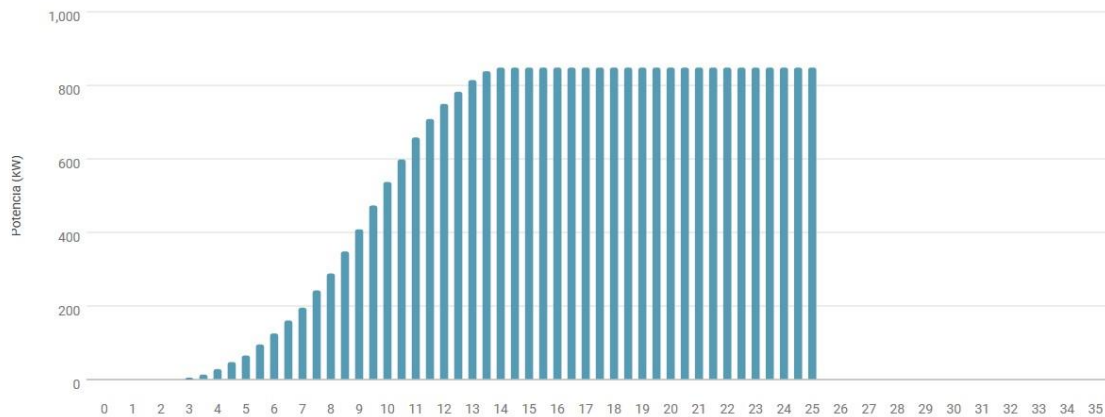


Figura 3.31: Curva de potencia del aerogenerador V52/850 (Fuente: Catálogo del Fabricante Vestas)

Después haber estudiado el terreno, y haber tenido en cuenta diferentes consideraciones técnicas, se propone la instalación de 3 aerogeneradores V52/850. De este modo, se conseguiría una producción anual de **4.253.647,95 kWh/año**. Gracias a esto, cubriría aproximadamente un 35,8% del consumo eléctrico actual. Como se muestra en la Figura 3.32, los aerogeneradores se situarán cerca de las llegadas de los remotes Pla de Baqueira, Mirador y Manaud.

- El potencial máximo de generación eléctrica se estima en 22,32 GWh anuales
- Potencia total instalada: **2,55 MW**

Al no disponer de datos sobre factores de capacidad mensuales de futuros parques eólicos, en el Valle de Arán, se asume un valor de capacidad máxima anual del 19,05%. Este valor deriva del Libro Blanco de la energía teniendo en cuenta los valores de potencia instalable y generación eléctrica anual estimada.

En el modelo se considerará un coste de 5,9 \$/MWh que se basan en IEA/NEA (2015)

La Figura 3.32, muestra el emplazamiento propuesto para los aerogeneradores, teniendo en cuenta todos los aspectos anteriormente citados. Se trata de la zona del Cap de Baqueira, como se ha comentado anteriormente. Además, tal y como se puede apreciar en la imagen, existen caminos habilitados precisamente para labores de mantenimiento en verano. También, se evita la construcción de nuevas pistas pudiendo aprovechar las ya existentes, que discurren al lado de la localización los aerogeneradores. De esta forma, se eludirá el impacto negativo que suponen los movimientos de tierra y otras obras relacionadas con la construcción de caminos para el transporte de las piezas del aerogenerador.



Figura 3.32: Localización de los aerogeneradores.

El sistema eléctrico de un parque eólico tiene por objeto la transferencia de energía eléctrica producida por cada aerogenerador a una red para su posterior consumo.

El tipo de diseño y trazado depende principalmente de la potencia de la instalación, número y localización de los aerogeneradores instalados, características de la red en el punto de entronque y distancia hacia el mismo.

Hoy en día, con aerogeneradores que van desde 500 kW a varios MW, la configuración utilizada es la conexión en MT de aerogeneradores entre sí, por lo que cada uno de ellos debe contar con su centro de transformación.

Diferenciamos en la instalación los siguientes elementos, que se muestran en la figura Figura 3.33:

1. Instalación eléctrica de BT de cada aerogenerador.
2. Red subterránea de MT.
3. Centro de transformación.

De esta forma cada uno de los tres aerogeneradores tendrá su propia instalación de baja tensión. Para conectar los aerogeneradores entre sí, se aprovechará el trazado resultante de unir los 3 puntos y se soterrará la línea de media tensión. Por último, hará falta un centro de transformación antes de verter la energía a la red eléctrica.



Figura 3.33: Esquema del sistema eléctrico de un parque eólico

3.8.4.2.1. Impactos negativos

- Posible transformación o pérdida del hábitat
- Posibles colisiones con el aerogenerador
- Molestias por ruido y/o vehículos empleados en el montaje
- Efecto barrera para las aves

3.8.4.2.2. Impactos positivos

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero
- Creación de puestos de trabajo
- Ahorro de combustibles fósiles

3.8.4.2.3. Mantenimiento

Los fabricantes de equipos generalmente especifican cuáles son los requerimientos para el mantenimiento de aerogeneradores. El sistema completo de generación eólica, incluyendo la torre, la góndola y todo el sistema de cableado deben ser inspeccionados por lo menos una vez al año. De igual forma se debe proceder para el sistema de paneles fotovoltaicos, si bien requiere un mantenimiento mínimo y sencillo, pero hay tareas que deben realizarse.

El mantenimiento de rutina para la instalación eólica, incluye el cambio de aceite de los transformadores, el engrase de las balineras y la inspección visual de las aspas, las torres y las conexiones eléctricas (Contreras and Mateo 2006). En general, para las actividades de mantenimiento, en lugar de hacerlo por los medios propios del proyecto, lo cual incluye el ascenso a las torres, se contratará una compañía especializada. En los aerogeneradores de diseño reciente, las balineras y los engranajes vienen equipados de fábrica con engrases sellados garantizados de por vida.

3.8.5. Costes y parámetros

Los costes considerados en el modelo, se detallan en la Tabla 3.23 y se basan en los costes estimados publicados por la Agencia Internacional de la Energía (Varro 2015).

Tecnología	Capacidad (MW) ^a	Eficiencia (%)	Disponibilidad (%)	Vida útil (años)	Costes de inversión (M\$/MW)	Costes O&M fijos (\$/MW)	Costes O&M variable (\$/MWh)
Solar fotovoltaica	1,02	100	12,21	25	2,297	28333	0
Eólica	2,25	100	19,05	25	1,804	45475	5,9

Tabla 3.23: Parámetros considerados en el módulo de generación eléctrica (^a Potencia máxima que llegará a instalarse)

Por otro lado, la Tabla 3.24 recoge el coste de importación de los diferentes recursos utilizados, la electricidad tomada de la Red Eléctrica española y los combustibles utilizados. El precio de la electricidad se ha obtenido de la Auditoría Energética de Baqueira Beret y es el valor medio resultante de los doce meses del año. Los precios de los combustibles se han deducido a partir de fuentes del Ministerio de Energía, Industria y Turismo. Se trata de los precios medios de la Gasolina Sin Plomo 95 y el Gasoil para la provincia de Lleida.

Si bien existen fuentes que realizan proyecciones tanto de la evolución precio de la electricidad como de los combustibles derivados del petróleo, éstas suelen ser a 2050. De fuentes como *Annual Energy Outlook* (EIA, 2018) y *World Energy Outlook 2015* (IEA, 2015), se ha deducido y considerado un aumento anual del 3% en todos ellos.

Recurso energético	Coste Importación 2016 (€/MWh)
Electricidad	132,573
Gasolina SP 95	126,3
Gasoil	98,9

Tabla 3.24: Coste de importación de los recursos energéticos

4. Resultados

4.1. Escenario A (Referencia):

Se trata del escenario que se tomará como referencia, en el que la temperatura aumenta 2°C, no existe adaptación por parte de los esquiadores y no hay medidas de eficiencia energética ni introducción de energías renovables.

La Figura 4.1 muestra el conjunto de la demanda eléctrica. Por un lado, la demanda de los remotes va en aumento mientras que las de las demás ramas se mantienen constantes. Además, el valor de los vehículos de transporte es nulo puesto que al tratarse de un escenario ineficiente, no se introducen todoterrenos eléctricos.

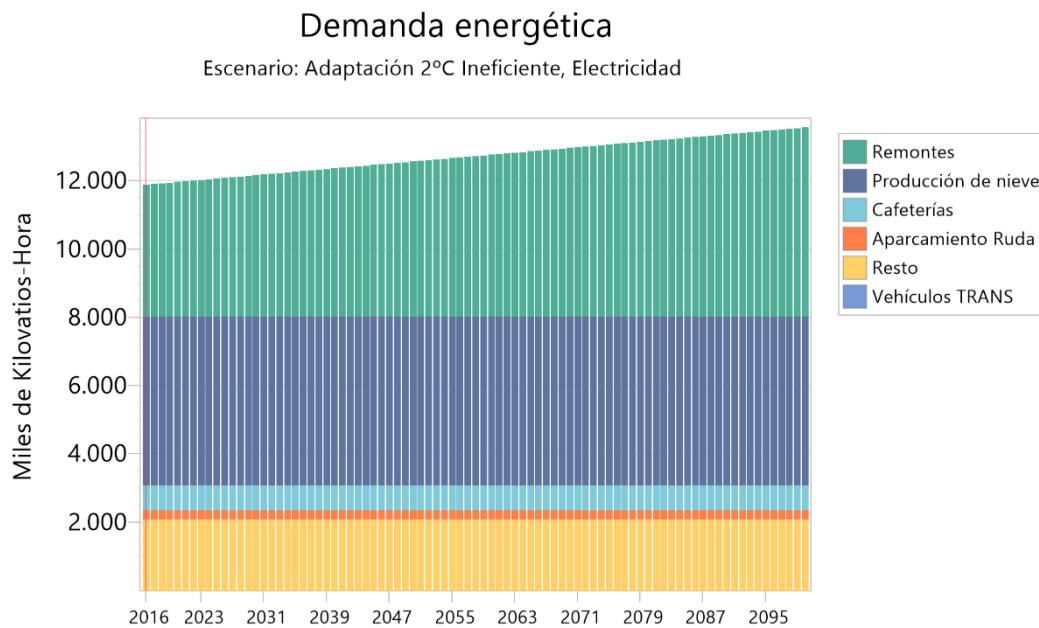


Figura 4.1: Evolución de la demanda energética de los equipos consumidores de electricidad, escenario A

La Figura 4.2 muestra la demanda energética total de los equipos consumidores de combustibles. Esta demanda se mantiene constante para todas las ramas.

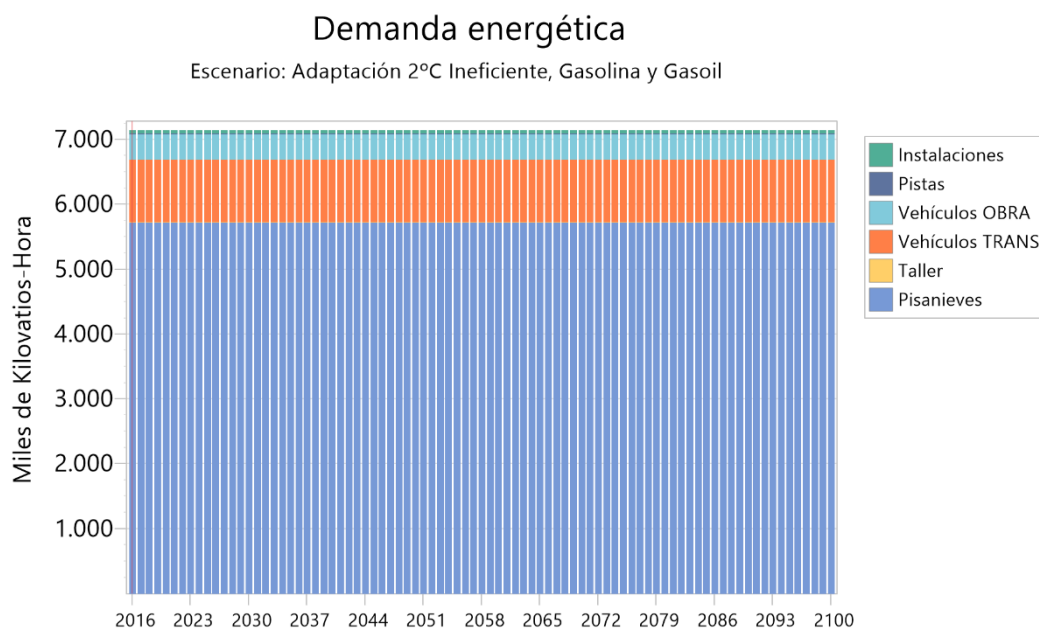


Figura 4.2: Demanda energética de combustibles, escenario A

Cabe mencionar que dentro del módulo de generación eléctrica, se ha creado una tecnología llamada *Electricidad España*. Se toma así para poder introducir los datos de consumo de electricidad de la Red Eléctrica de España y contabilizar las emisiones asociadas a su mix eléctrico. De esta forma, cuando se introduzcan las tecnologías renovables, será posible cuantificar y visualizar el origen de la electricidad consumida. En cierta medida, la electricidad que podemos obtener de la red es ilimitada. No ocurre lo mismo con la capacidad de generación a partir de fuentes renovables. Esto significa que se consumirá toda la energía proveniente de fuentes renovables que se genere y que se cogerá de la red la energía necesaria restante. Por lo tanto, al hablar de generación de la tecnología *Electricidad España* será realmente la energía que tomemos de la Red Eléctrica de España (que no se genera propiamente en la estación como en el caso de la *Eólica* y la *Solar fotovoltaica*).

Esta generación eléctrica (que realmente es la electricidad que se toma de la red), se muestra en la Figura 4.3.

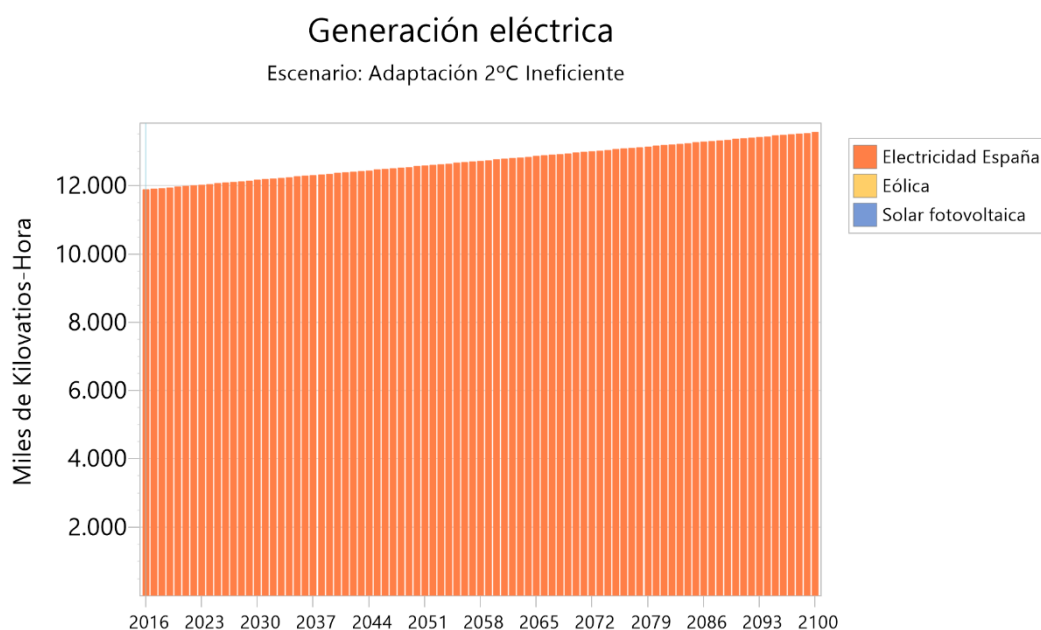


Figura 4.3: Generación eléctrica, escenario A

La Figura 4.4 muestra las emisiones de dióxido de carbono, tanto del módulo de demanda como del módulo de transformación, que en este caso se trata de la generación eléctrica. Se puede ver que las emisiones aumentan progresivamente en el tiempo debido al aumento de las emisiones de la electricidad asociada a los remotes.

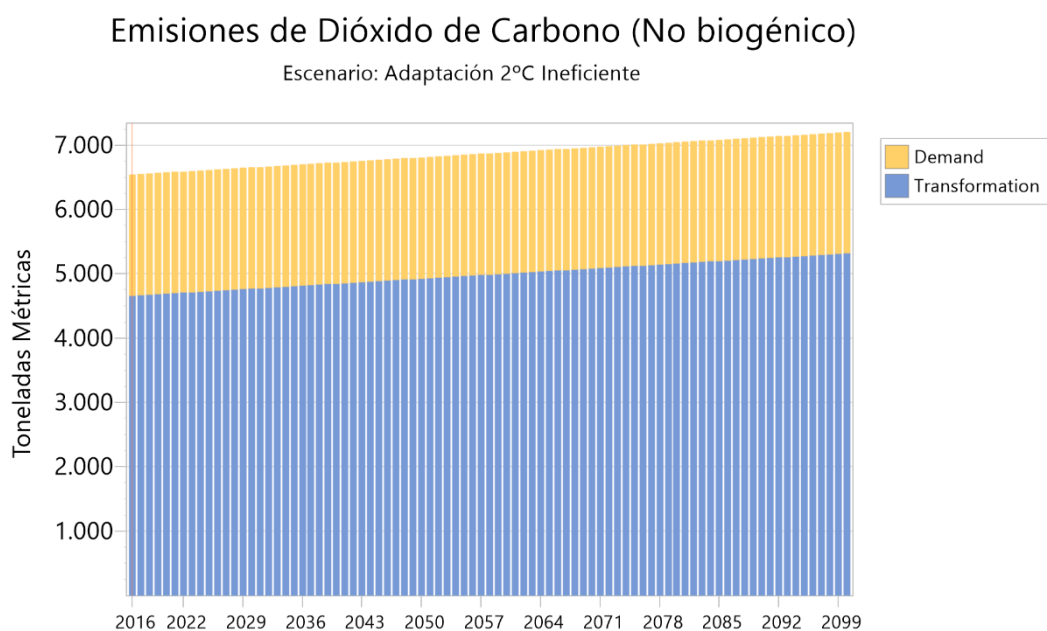


Figura 4.4: Emisiones de CO₂, escenario A

4.2. Escenario B

En este escenario se considera un aumento de temperatura de 2°C. Hay un proceso de adaptación por parte de los esquiadores. Además se introducen medidas de eficiencia energética y energías renovables.

La evolución de la demanda eléctrica de los remontes es la misma que en el escenario de referencia puesto que en ambos se considera un proceso de adaptación de los esquiadores ver Figura 4.1.

La Figura 4.5 muestra la evolución de la demanda energética a lo largo del siglo. Cabe destacar, que la introducción de máquinas pisanieves eficientes, reduce el consumo energético desde el momento en que se ponen en funcionamiento. Por otro lado, al recibir más visitantes, el consumo de los remontes aumenta debido al incremento del factor de carga de éstos.

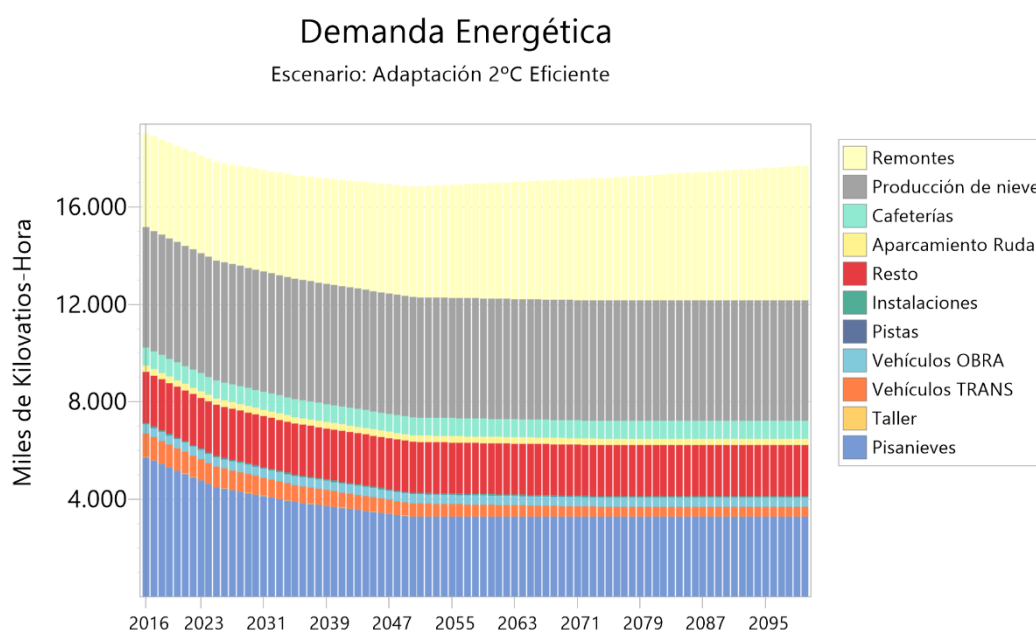


Figura 4.5: Evolución de la demanda eléctrica total, escenario B

La Figura 4.6 muestra la evolución de la generación eléctrica. Las tecnologías renovables no generan hasta 2030, año en el que se introducen y por tanto existirá una potencia instalada. Por otro lado, se pueden observar escalones en las tecnologías solar y eólica, debidos, precisamente a una introducción escalonada de estas.

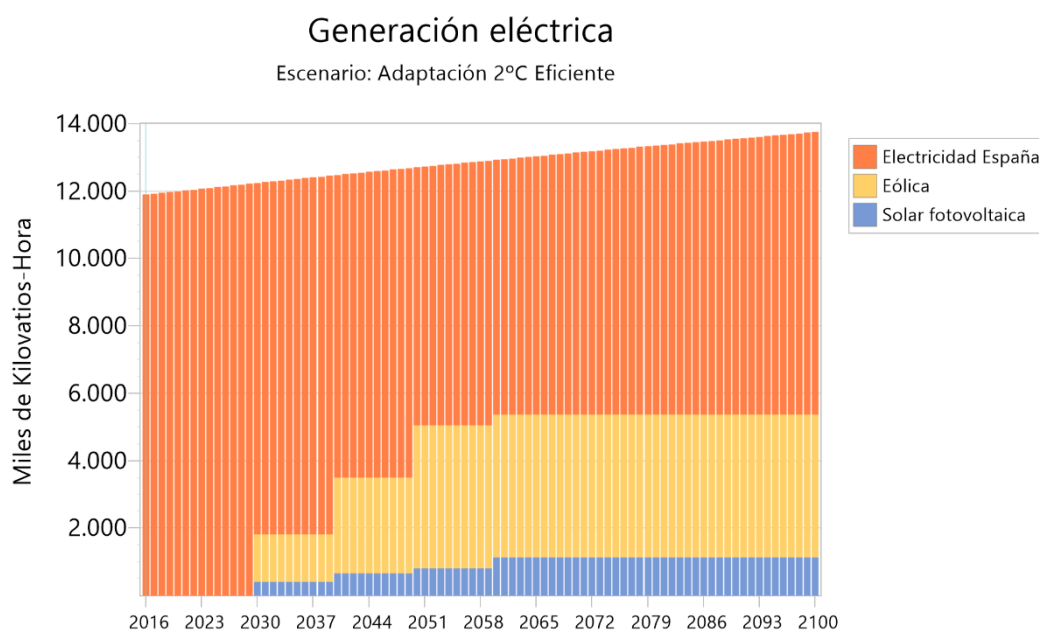


Figura 4.6: Evolución de la generación eléctrica, escenario B

La Figura 4.7 muestra la evolución de las emisiones de dióxido de carbono no biogénico. Como se puede apreciar, la reducción es considerable a final de siglo.

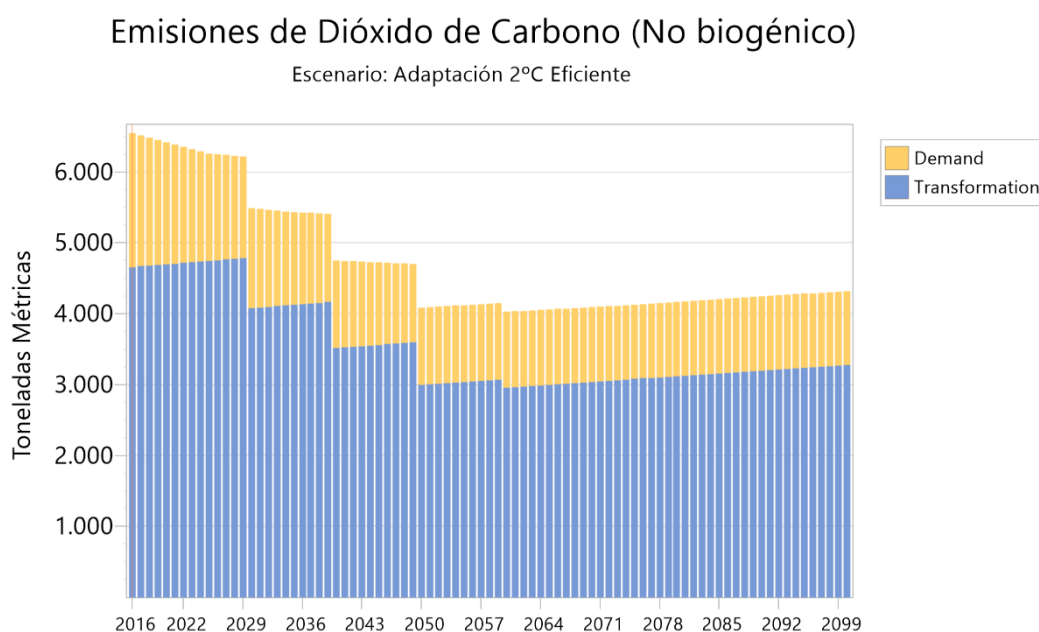


Figura 4.7: Emisiones de CO₂, escenario B

4.3. Escenario C

El escenario C no considera una adaptación por parte de los esquiadores, no contempla la introducción de medidas de eficiencia ni energías renovables y no requiere producción de nieve. Se trata, pues, de un escenario inmovilista en el que la demanda se mantiene constante. La Figura

4.8 muestra la demanda energética total constante teniendo en cuenta tanto los equipos consumidores de electricidad como los consumidores de combustible.

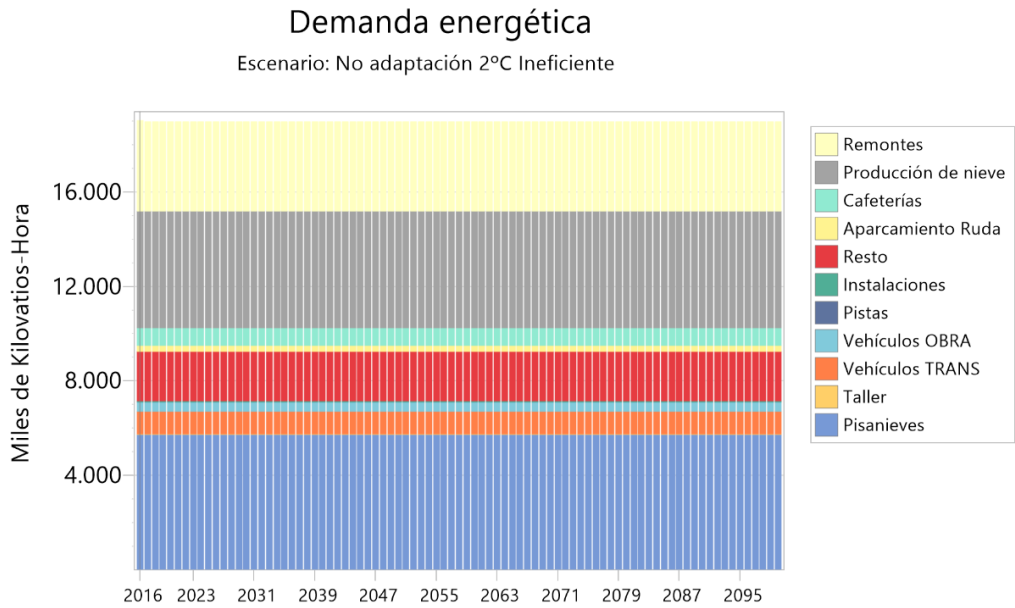


Figura 4.8: Demanda energética total, escenario C

La Figura 4.9 muestra la generación eléctrica en el escenario C. En este caso, al tratarse de un escenario ineficiente, no hay energías renovables y por tanto se toma toda la electricidad necesaria, de la red.

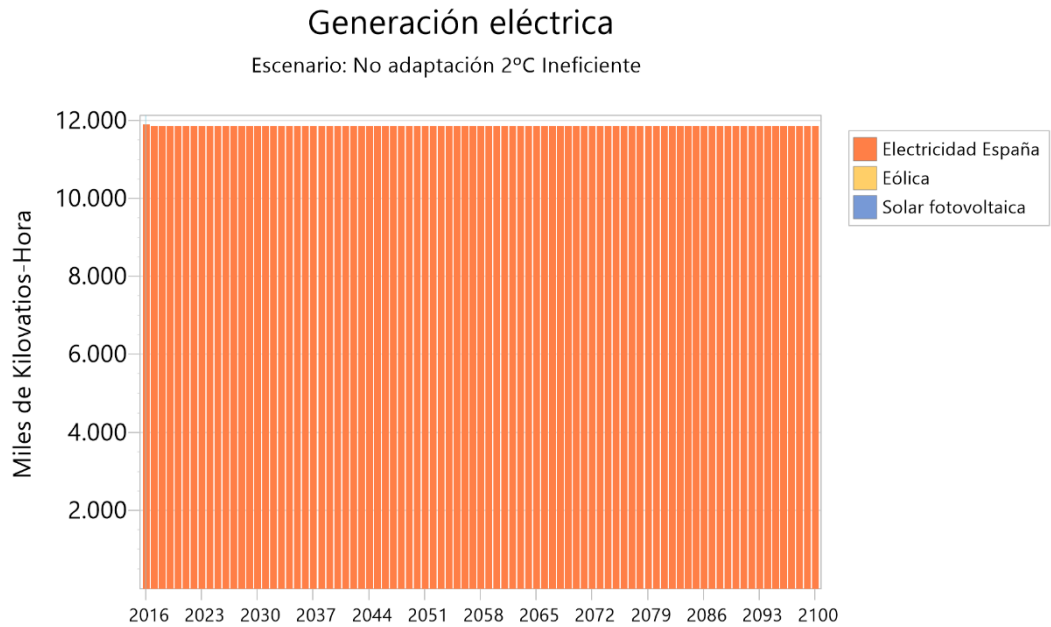


Figura 4.9: Generación eléctrica, escenario C

La Figura 4.10 muestra cómo los niveles de CO₂ se mantienen constantes a lo largo de todo el periodo de estudio.

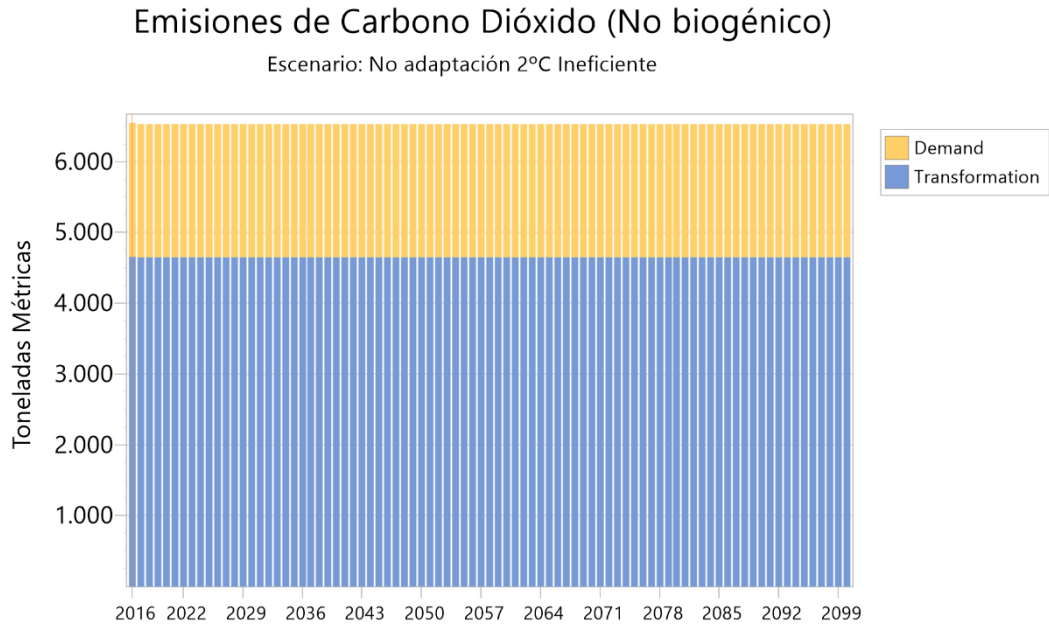


Figura 4.10: Emisiones de CO₂, escenario C

4.4. Escenario D

El escenario D contempla la introducción de medidas de eficiencia energética y también las energías renovables. Sin embargo, no habrá producción de nieve ni tampoco aumento de los visitantes.

La Figura 4.11 nos muestra la evolución de la demanda energética a lo largo del siglo. Cabe destacar, que la introducción de máquinas pisanieves eficientes, reduce el consumo energético desde el momento en que se introducen. Por otro lado, al no recibir más visitantes, el consumo de los remontes permanece constante.

Al tratarse de un escenario eficiente, la generación estará formado además de por la ya comentada *Electricidad España*, por la electricidad producida a partir de las tecnologías renovables.

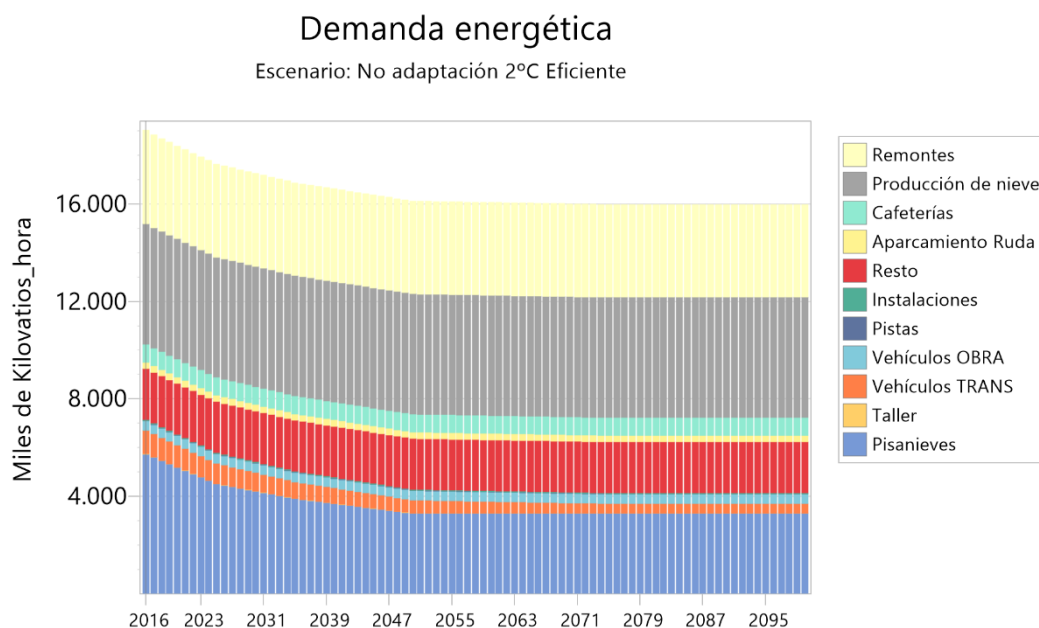


Figura 4.11: Demanda energética, escenario D

La Figura 4.12 muestra la generación eléctrica de la estación. Se puede apreciar el efecto que tiene la introducción de energías renovables, que alcanza su máximo en 2060. La energía necesaria restante, se toma de la red.

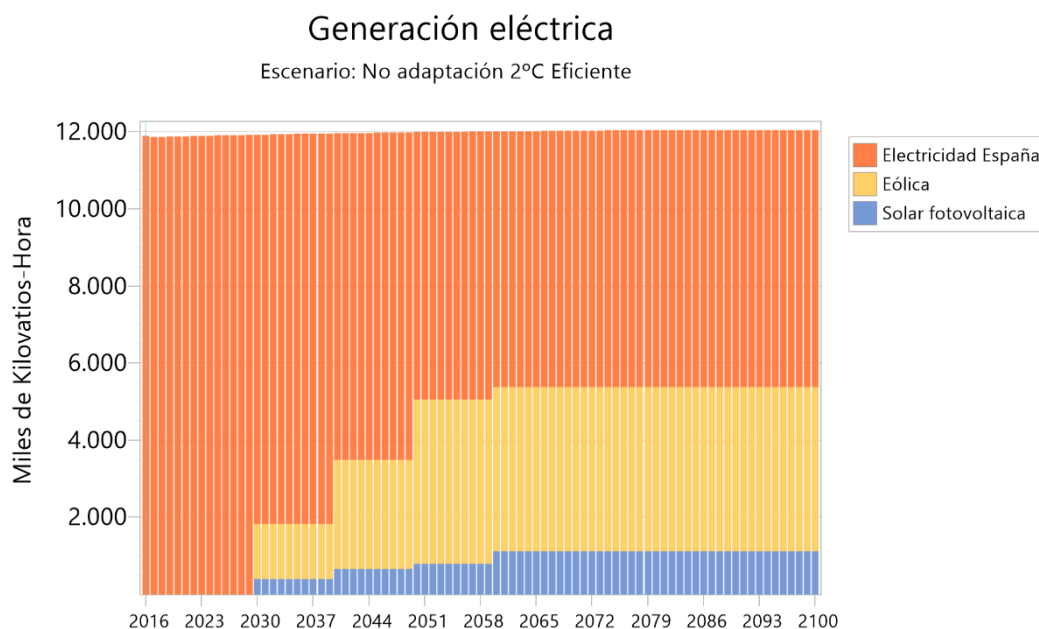


Figura 4.12: Generación eléctrica, escenario D

Las emisiones de CO₂ resultantes del escenario D se muestran en la Figura 4.13. Se trata de un escenario bastante favorable puesto que las emisiones de CO₂ se reducen prácticamente a la mitad. Esto se debe a que es un escenario bastante sostenible en términos energéticos puesto que no

requiere de producción de nieve y al no aumentar el número de visitantes, el consumo de los remontes permanece constante.

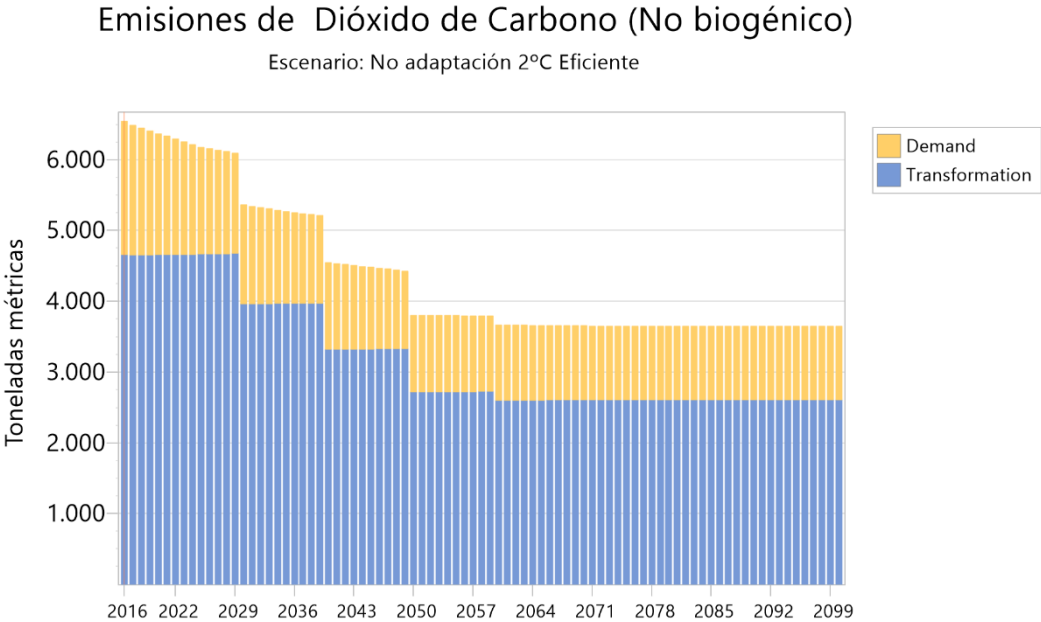


Figura 4.13: Emisiones de CO₂, escenario D

4.5. Escenario E

El escenario E se basa en un aumento de temperatura de 4°C. Esto significa que será necesario producir nieve y por tanto, aumentará la demanda energética de los sistemas de producción de nieve como las bombas y los compresores. Además, habrá un proceso de adaptación por parte de los esquiadores que se traducirá en un aumento del factor de carga de los remontes. Por último, se trata de un escenario en el que no habrá medidas de eficiencia energética ni energías renovables.

La Figura 4.14 muestra la demanda energética desagregada. La rama de los remontes sufre un incremento y se debe, como se ha comentado anteriormente al incremento de usuarios de la estación. Por otro lado, la rama de la producción de nieve también aumenta debido a un mayor consumo de las bombas y compresores.

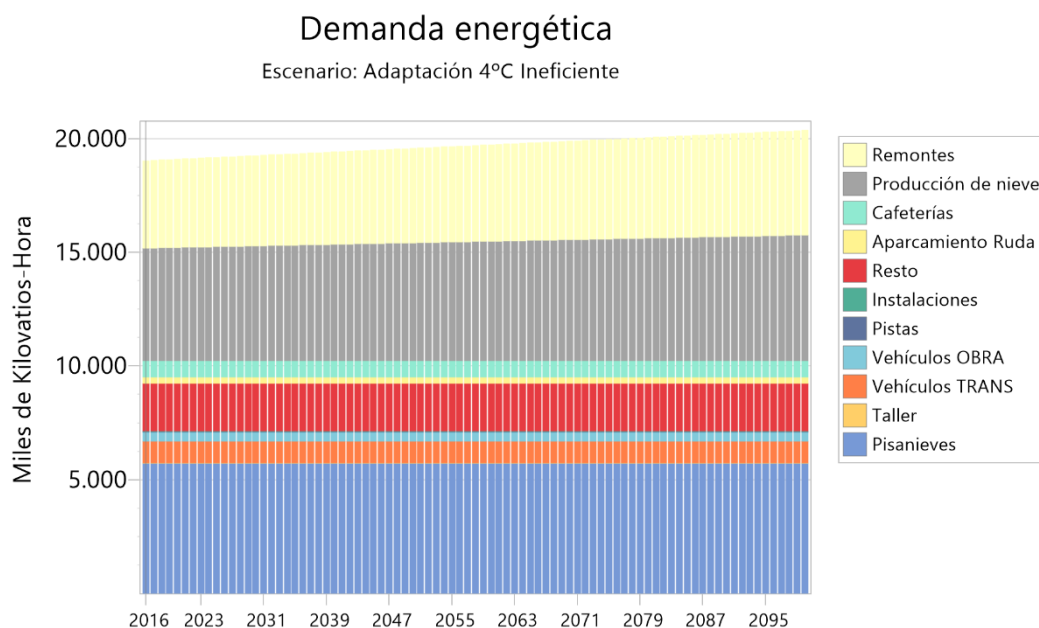


Figura 4.14: Demanda energética, escenario E

La Figura 4.15 muestra el aumento en el consumo energético de la estación. Además al tratarse de un escenario ineficiente, no hay energías renovables y por tanto la generación a partir de renovables es nula y se tiene que tomar toda la energía de la red.

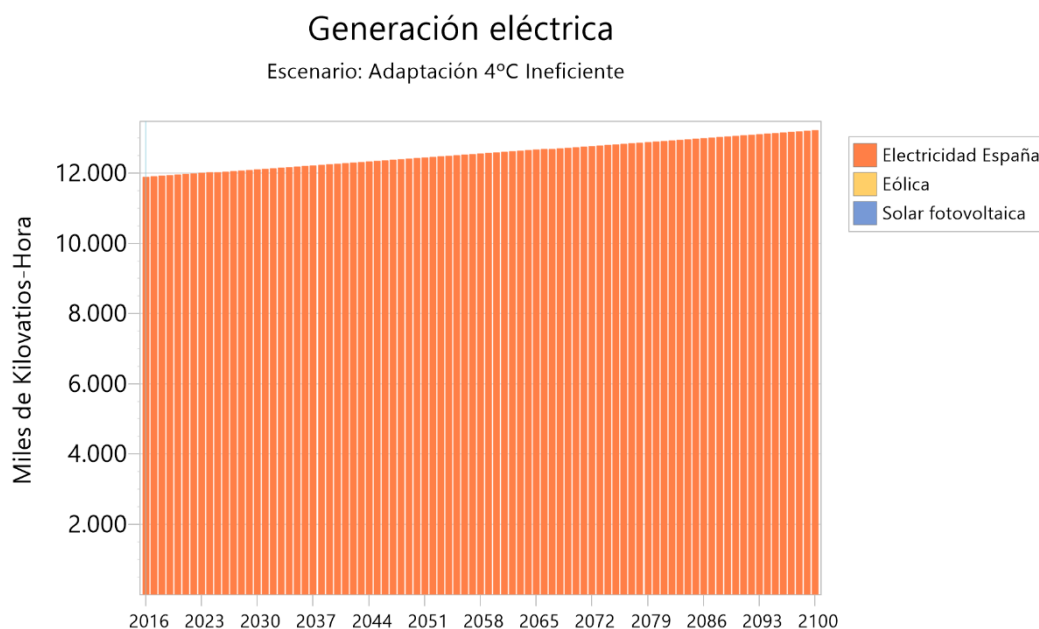


Figura 4.15: Generación eléctrica, escenario E

La Figura 4.16 muestra el incremento de las emisiones de CO₂ debido tanto a un aumento en la demanda como en la transformación.

Emisiones de Dióxido de Carbono (No biogénico)

Escenario: Adaptación 4°C Ineficiente

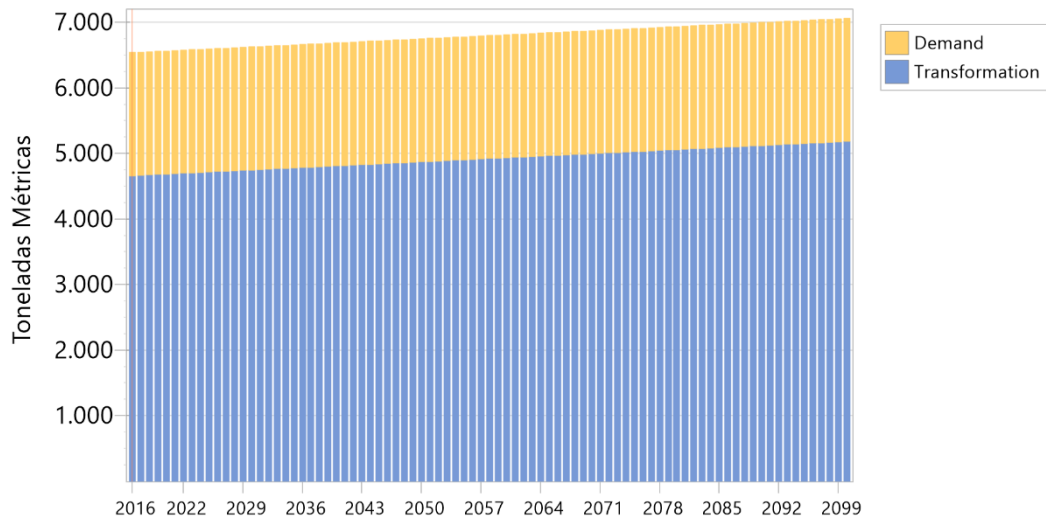


Figura 4.16: Emisiones de CO₂, escenario E

4.6. Escenario F

El escenario F se caracteriza por un aumento de 4°C y por tanto requiere producción de nieve y un aumento en la demanda de los equipos de producción. También considera la adaptación de los esquiadores y un aumento en el número de usuarios. Por último, este escenario incluye medidas de eficiencia energética e introducción de energías renovables.

La Figura 4.17 muestra la demanda energética a lo largo del siglo XXI. La demanda de los remotes aumenta, debido al aumento del factor de carga. La producción de nieve, también aumenta, como consecuencia del aumento de temperatura. Por otro lado, las medidas de eficiencia energética como la introducción de todoterrenos eléctricos y nuevas máquinas de pisado más eficientes, hace que la demanda para estos casos disminuya.

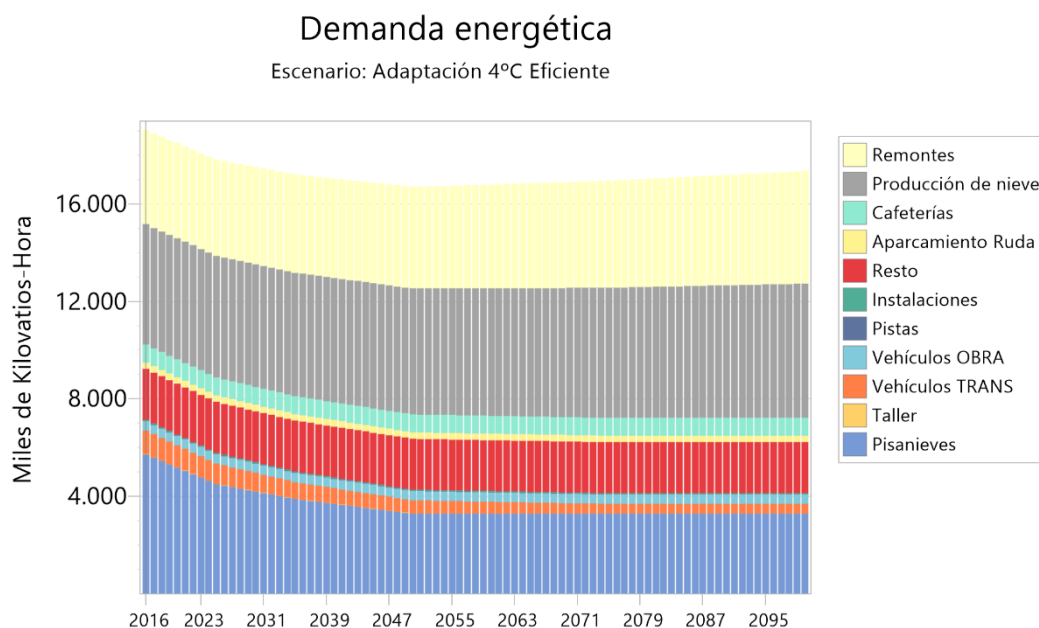


Figura 4.17: Demanda energética por ramas, escenario F

La Figura 4.18 muestra la generación eléctrica para la estación de esquí. Se puede apreciar como la introducción de energías renovables tiene un efecto positivo, puesto que hace que sea menos la energía que tiene que tomarse de la red eléctrica.

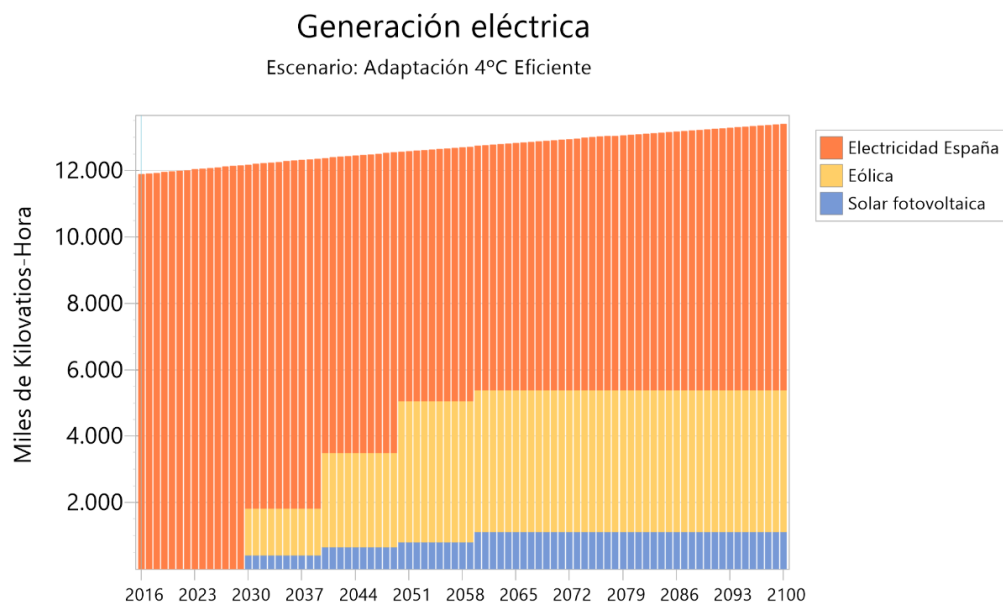


Figura 4.18: Generación eléctrica, escenario F

La Figura 4.19 muestra las emisiones de CO₂ a lo largo del periodo de estudio. En este sentido, se trata de un escenario bastante favorable puesto que se reducen considerablemente para el final de periodo. Las medidas de eficiencia energética tienen un impacto positivo en esta reducción.

Emisiones de Dióxido de Carbono (No biogénico)

Escenario: Adap 4°C Eficiente

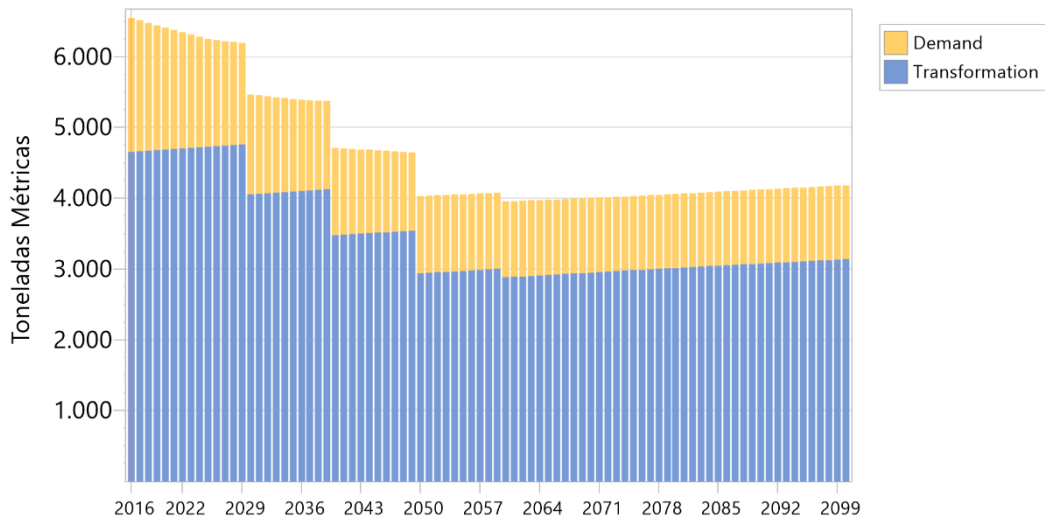


Figura 4.19: Emisiones de CO₂, escenario F

4.7. Escenario G

El escenario G, considera un aumento de 4°C y por tanto un incremento en la producción de nieve y el consumo eléctrico derivado de esta. Por otro lado, no contempla adaptación alguna por parte de los esquiadores. Por último, no existirán medidas de eficiencia energética ni energías renovables. La Figura 4.20 muestra la demanda energética de este escenario, en el que únicamente aumenta la demanda de la producción de nieve debido a un mayor consumo eléctrico de las bombas y compresores.

Demanda energética

Escenario: No adaptación 4°C Ineficiente

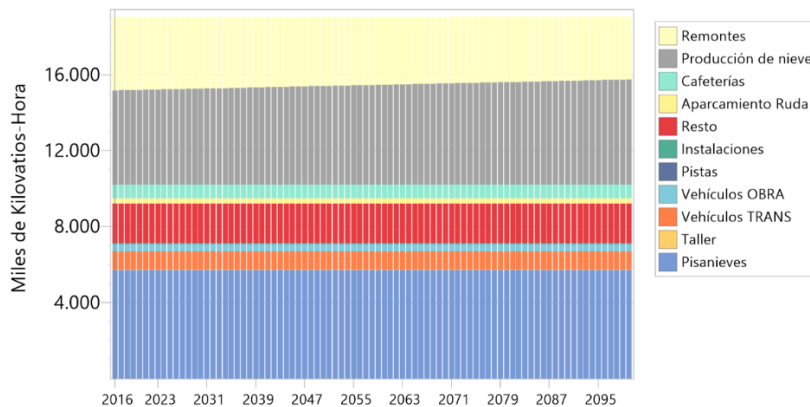


Figura 4.20: Demanda energética, escenario G

La Figura 4.21 muestra la generación eléctrica para el siglo XXI, que se mantiene prácticamente constante, puesto que el aumento debido a un mayor uso de los remontes apenas se percibe. En

ésta, no aparecen las energías renovables puesto que se trata de un escenario ineficiente. Por tanto, toda la energía necesaria tendrá que tomarse de la red.

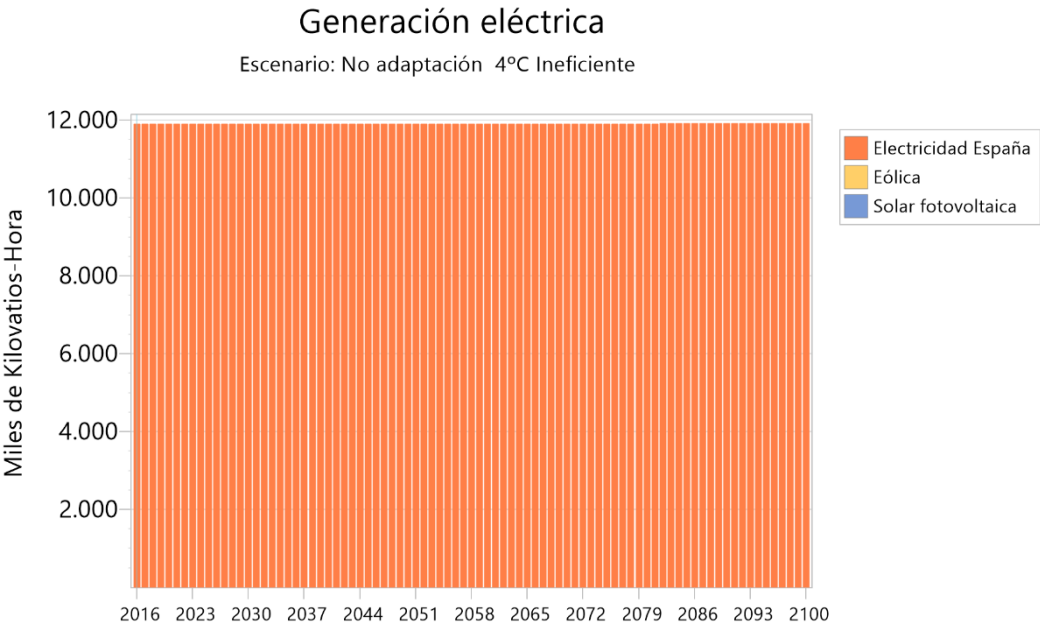


Figura 4.21: Generación eléctrica, escenario G

La Figura 4.22 muestra las emisiones de CO₂, que se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todo el periodo.

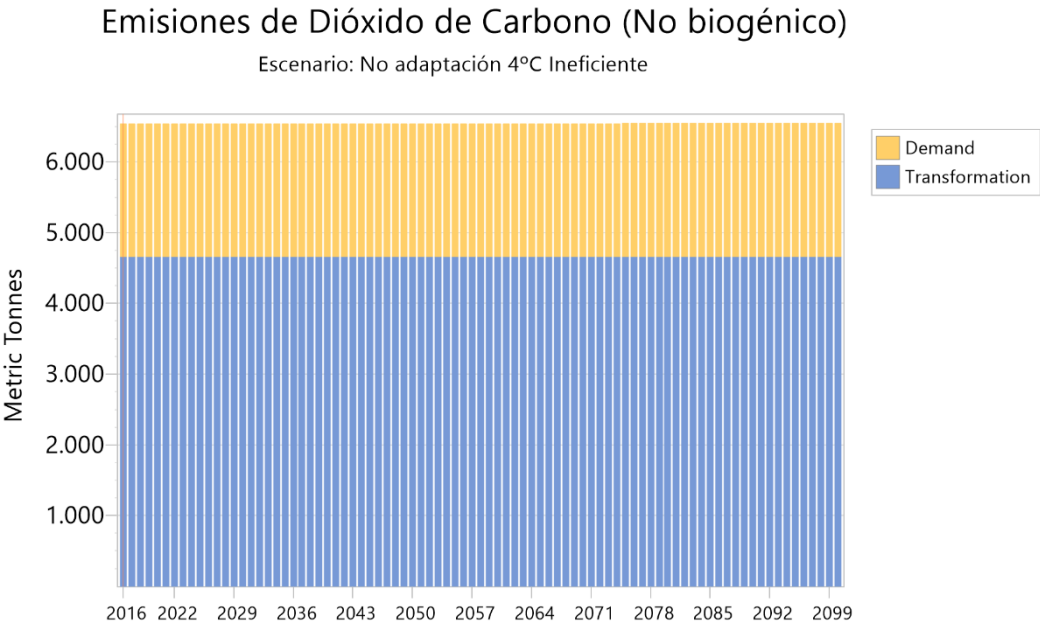


Figura 4.22: Emisiones de CO₂, escenario G

4.8. Escenario H

El escenario H se basa en un aumento de temperatura de 4°C y por tanto será necesaria la producción de nieve. Este escenario no contempla la adaptación por parte de los esquiadores. Sin embargo, sí que introduce medidas de eficiencia energética y energías renovables.

La Figura 4.23 muestra la demanda energética para las ramas del modelo. La demanda de los remotes, se mantiene constante, puesto que no hay un aumento de visitantes. La producción de nieve aumenta para poder hacer frente al incremento de la temperatura. Por otro lado, la demanda de la rama Vehículos de transporte (donde se encuentran los todoterrenos eléctricos), se ha reducido debido a la introducción de medidas de eficiencia energética, que también inciden en la reducción de la demanda de los pisanieves.

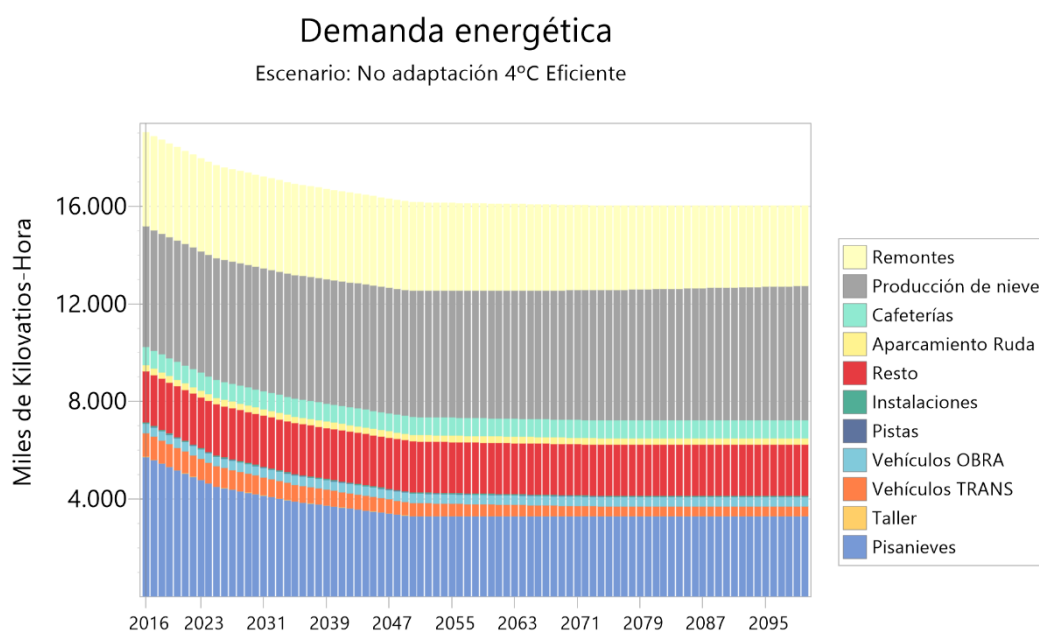


Figura 4.23: Demanda energética, escenario H

La Figura 4.24 muestra la generación eléctrica para este escenario. Al tratarse de un escenario eficiente con energías renovables, se puede apreciar el aporte de las tecnologías de generación eólica y solar fotovoltaica.

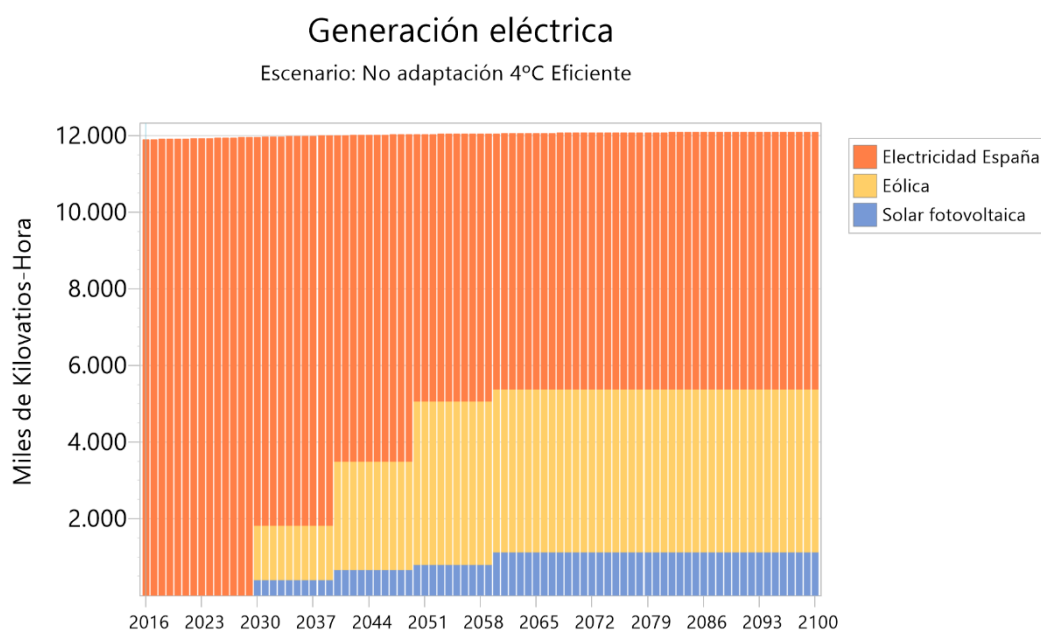


Figura 4.24: Generación eléctrica, escenario H

La Figura 4.25 muestra las emisiones de CO₂ para el periodo de estudio, que se ven reducidas prácticamente a la mitad para finales de siglo XXI. Las medidas de eficiencia energética y la introducción de energías renovables juegan un papel importante en este sentido, ayudando a reducir las emisiones de manera considerable.

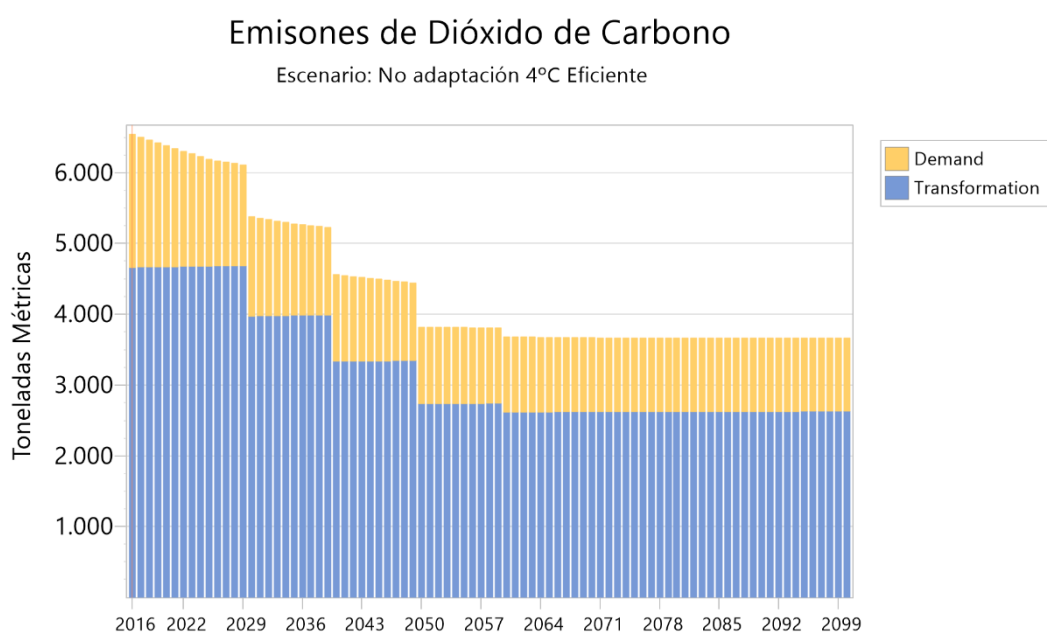


Figura 4.25: Emisiones de CO₂, escenario H

4.9. Todos los escenarios

Por último, para poder tener una visión global de todos los resultados anteriormente expuestos, la Figura 4.26 muestra una línea de tendencia en la demanda energética para los ocho escenarios.

En base a los resultados obtenidos, se pueden clasificar los escenarios en cuatro grupos:

- **Escenarios desfavorables:** Escenario de Referencia (Adaptación, 2°C e Ineficiente) y el escenario E (Adaptación, 4°C e Ineficiente)
- **Escenarios inmovilistas:** Escenario C (No adaptación, 2°C e Ineficiente) y el Escenario G (No adaptación, 4°C e Ineficiente)
- **Escenarios favorables:** El Escenario B (Adaptación, 2°C y Eficiente) y el escenario F (Adaptación, 4°C y Eficiente)
- **Escenarios muy favorables:** Escenario H (No adaptación 4°C y Eficiente) Escenario D (No adaptación, 2°C y Eficiente)

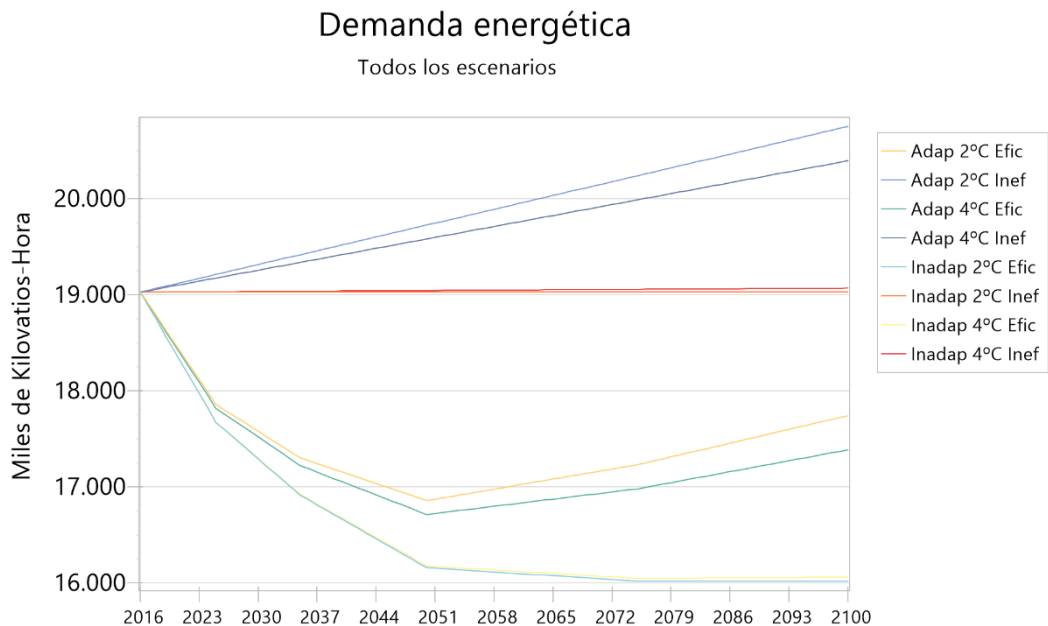


Figura 4.26: Demanda energética de todos los escenarios

Emisiones de Dióxido de Carbono (No biogénico)

Todos los escenarios

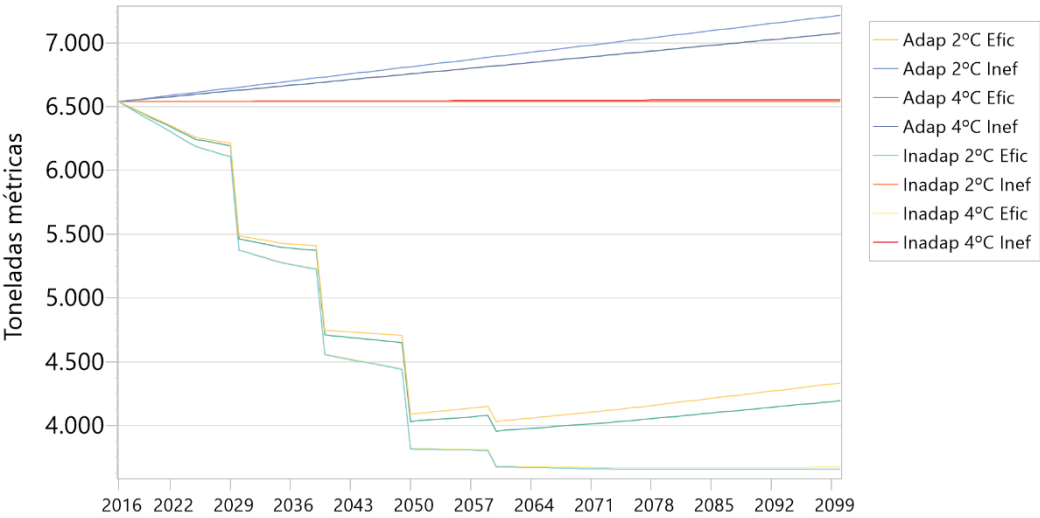


Figura 4.27: Emisiones de CO₂ para todos los escenarios

5. Discusión de resultados

Una vez finalizada la implementación de los diferentes módulos que caracterizan el sistema energético de la estación, se han presentado los principales resultados obtenidos, recogidos en el apartado anterior.

A la hora de interpretar los resultados conviene tener en cuenta ciertos aspectos:

- La elección de la escala temporal: inicialmente se pensó en realizar el estudio para un periodo de 50 años. Sin embargo, el estudio sobre la vulnerabilidad de las estaciones de esquí del pirineo se llevó a cabo para finales de siglo, y al ser éste determinante para el desarrollo del trabajo, se optó por tomar su misma escala temporal.
- Para la generación eléctrica, el modelo LEAP-Baqueira agrega los diferentes procesos según el tipo de instalación. Es el caso de la generación solar fotovoltaica en el que dos grupos o instalaciones diferentes, se han tomado como una única. En ese sentido, sería conveniente desagregarlos.
- Los potenciales teóricos de las diferentes fuentes de energía se han calculado de la forma más acorde a la escala y alcance del presente trabajo. Sería interesante llevar a cabo procedimientos aún más precisos para poder tener una estimación más real y compararla con los resultados actuales.

5.1. Eficiencia energética

Este trabajo ha permitido determinar la relación existente entre la adopción de medidas de eficiencia energética y su efecto en la reducción de la demanda y la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

La sustitución de las actuales máquinas pisanieves por un modelo más actual y eficiente supone una reducción de la demanda energética del 42,72%. Esta reducción se debe básicamente al menor consumo energético específico [MJ/h] de las nuevas máquinas. Se trata de un valor muy a tener en cuenta puesto que el parque de pisado representa un alto porcentaje de la demanda total. Los datos empleados vienen de una fuente totalmente fiable como es el departamento técnico de Baqueira Beret S.A., que recoge y contabiliza en otros, el consumo, horas de trabajo y características técnicas de cada máquina pisanieves.

Por otro lado, la introducción de todoterrenos eléctricos como vehículos de transporte implica dejar de lado los combustibles fósiles y utilizar la electricidad como recurso. Esto se traduce en una reducción de la demanda energética del 58,51%. Es un porcentaje alto y se debe al bajo rendimiento que tiene un motor de combustión con respecto a un motor eléctrico.

Los resultados obtenidos para la introducción de medidas de eficiencia son coherentes y se corresponden con la realidad.

Cabe mencionar que para la realización de este trabajo únicamente se han contemplado estas dos medidas de eficiencia energética. Para una mayor precisión y unos mejores resultados en cuanto a reducción del consumo, convendría estudiar otro tipo de medidas como mejoras en la producción de nieve y/o sustitución del sistema de alumbrado de parking por tecnología de alto rendimiento o tecnología LED.

5.2. Potencial de generación solar fotovoltaica

En la línea de abordar las limitaciones existentes de que respectan al potencial teórico de las diferentes tecnologías, se ha trabajado en la estimación del potencial de la energía solar fotovoltaica en cubiertas de remotes y edificios de la estación. Con la metodología empleada de los apartados 3.8.4.1.1 y 3.8.4.1.2 se ha deducido una cobertura del 9,5% del actual consumo eléctrico.

A diferencia de otras zonas geográficas, la disponibilidad del recurso solar en zonas de montaña es muy heterogénea, estando influenciada por la topografía.

Existen diferentes métodos para estimar el potencial fotovoltaico de grandes áreas geográficas, desde métodos simples basados en factores aplicados al total de superficie de las cubiertas disponibles hasta métodos más complejos basados en Sistemas de Información geográfica (SIG) y/o modelos tridimensionales.

La herramienta PVGIS utilizado en este estudio utiliza datos de satélite para estimar la radiación solar que llega a la superficie de la tierra. En su mayoría, estos métodos utilizan datos de satélites meteorológicos geoestacionarios. Las ventajas de usar tales datos son:

- Los datos de radiación solar están disponibles en toda el área cubierta por las imágenes de satélite, por ejemplo, los satélites METEOSAT cubren África, Europa y la mayor parte de Asia hasta aproximadamente 60°N, con una resolución de imagen de unos pocos kilómetros.
- Normalmente, hay series de tiempo largas disponibles, hasta 30 años o más.

La desventaja de utilizar datos satelitales es que la radiación solar a nivel del suelo debe calcularse utilizando varios algoritmos matemáticos bastante complicados que utilizan no solo datos satelitales sino también datos sobre vapor de agua atmosférico, aerosoles (polvo, partículas) y ozono. Algunas condiciones pueden hacer que los cálculos pierdan precisión, por ejemplo:

- Nieve que puede confundirse con nubes.
- Tormentas de polvo que pueden ser difíciles de detectar en las imágenes de satélite.

Varios artículos científicos han presentado resultados de validación para los datos de radiación solar satelital utilizados en PVGIS comparando con mediciones de estaciones terrestres (Mueller et al., 2009, Mueller et al., 2012, Huld et al., 2012, Gracia Amillo et al., 2014).

Esta aplicación también tiene en cuenta la radiación solar en planos inclinados, la influencia de las sombras del terreno, la potencia nominal de los módulos fotovoltaicos y la potencia real, que depende a su vez de la reflexión del ángulo bajo, del efecto de cambios en el espectro solar, de la irradiancia y la temperatura del módulo, las pérdidas del sistema y la degradación con el tiempo.

Hay que tener en cuenta que las series de tiempo disponibles son para 30 años o más. Por otro lado la vida útil de este tipo de instalaciones es de unos 25 años. Esto significa que para un periodo de estudio como éste, pueden darse cambios significativos tanto a nivel de datos como de características técnicas de la tecnología solar fotovoltaica.

Por otro lado, la metodología empleada para el estudio es una combinación de la herramienta PVGIS y un método simple basado en la aplicación de factores al total de superficie de las cubiertas disponibles. Es decir, se ha tenido en cuenta la superficie disponible pero no la geometría de la misma, que influye en la distribución, colocación y por tanto, en el número de paneles que pueden instalarse.

Como se explicó anteriormente, para el cálculo del potencial fotovoltaico se han considerado dos grupos o tipos de instalaciones (remontes y edificios). Cada una de estas instalaciones tiene una potencia instalada, una estimación de generación eléctrica y una disponibilidad máxima. La disponibilidad máxima es el máximo porcentaje de horas que dicha energía está disponible durante cada periodo de despacho. La disponibilidad máxima se calcula como la máxima generación dividido entre la potencia instalada. En este caso, la generación considerada es para un periodo anual. Para lograr una mayor exactitud, sería conveniente trabajar a escala mensual, es decir, teniendo en cuenta la generación mes a mes puesto que el potencial de generación varía de una estación a otra. De esta forma se puede conseguir una curva de disponibilidad que varía estacionalmente.

5.3. Potencial de generación eólica

Como se ha comentado en el apartado 3.8.4.2 dedicado a la energía eólica, la herramienta que se ha utilizado para el cálculo del potencial de generación eléctrica con tecnología eléctrica es una

aplicación desarrollada por Enair. Los resultados obtenidos con la metodología llevada a cabo, muestran una cobertura del 35,8% de la demanda eléctrica actual.

El atlas empleado en la aplicación, combina las principales fuentes de datos internacionales, para determinar con gran exactitud los cálculos derivados del mismo. Las fuentes consultadas son: DTU, MERRA-2, VAISALA y BBDD propia la cual parte con el origen de la NASA corregido. Estas fuentes de datos son cálculos internacionales y además de ellas para cálculos en España, se usa también en combinación la fuente de datos del CENER. No obstante, y dada la complejidad de los cálculos pueden existir márgenes de error en las medias de viento que pueden variar del 1 al 15%, también es importante considerar que no se aplican pérdidas por turbulencias de objetos cercanos.

Además, de cada una de las anteriores fuentes consultadas, se obtienen el grado de confianza, la dispersión de la zona, el coeficiente Weibull C, Weibull K, la rosa de los vientos y la variación mensual. Para cada fuente de datos, la aplicación calcula una velocidad media del viento en la zona y así poder generar el estudio de producción eólica. Los valores obtenidos, se utilizan posteriormente para el cálculo de las medias, que se aplican según el grado de confianza de los mismos.

Esta aplicación genera también un histograma, una representación gráfica de cómo se reparte el historial de vientos y que tiene en cuenta los valores de velocidad del viento en m/s más constantes de la zona, mostrando para cada velocidad de viento los valores Weibull y las medias de Weibull. Asimismo, el cálculo realizado tiene en cuenta la variación estacional y la variación espacial del tiempo.

El punto débil de esta metodología reside en la extrapolación realizada para obtener la producción eléctrica de un día. Debido a que es una herramienta desarrollada por Enair, empresa manufacturadora de aerogeneradores, la aplicación nos da la opción de simular el potencial de generación eólica sólo para los modelos que comercializa y que tienen una potencia nominal determinada. Como para esta instalación se ha optado por una turbina eólica de otro fabricante y potencia nominal diferente, se ha extrapolado el resultado obtenido para un modelo de Enair. Sin embargo, esto no debe influir en el resultado puesto que el factor determinante es la velocidad media del viento en una zona y a una altura dada. A partir de la velocidad media del viento, se calcula la generación en base a la curva de potencia de la turbina eólica en cuestión. Esto es, la generación eólica es proporcional a la potencia instalada pero depende de la curva de potencia de cada aerogenerador.

5.4. Contabilización de emisiones

La contabilización de las emisiones derivadas tanto del consumo como de la transformación energética es un punto clave del estudio. LEAP toma por defecto los valores del potencial de calentamiento global estándares recomendados por el IPCC en su segundo informe de evaluación. Sin embargo, ofrece la opción de realizar dicha contabilización en base a los valores propuestos del quinto informe de evaluación, tal y como se ha realizado en este estudio.

En el apartado de resultados de este trabajo, sólo se han presentado las emisiones de CO₂ por ser las más representativas. Sin embargo, LEAP es capaz de calcular los efectos individuales de los principales gases de efecto invernadero, las emisiones directas de GHG en el punto de emisión para valores a 20, 100 y 500 años de potencial de calentamiento global, las emisiones directas asociadas a la demanda y las indirectas, relacionadas con la transformación. Por lo tanto, en caso de querer obtener información adicional, basta con seleccionar en la ventana de resultados el formato en que se quiera visualizar las emisiones.

6. Conclusiones

Este Trabajo Final de Máster parte de unos objetivos amplios y ambiciosos: “Analizar la eficiencia energética de la estación, estudiar la posible introducción de energías renovables y observar el efecto que éstas tienen a nivel de demanda energética, generación eléctrica y emisiones”. La propia naturaleza de estos objetivos hace que sea necesaria una gran perspectiva para poder valorar su consecución.

Los resultados derivados de la modelización no hay que entenderlos como una única verdad absoluta sino que tienen que servir para ayudar a diseñar políticas de futuro basadas en un estudio científico. La modelización de sistemas energéticos es una herramienta potente que puede ayudar a visualizar el futuro de manera simple, facilitando la toma de decisiones, sobre todo para aquellas personas poco especializadas en un determinado campo.

Las principales virtudes del modelo LEAP-Baqueira son: la capacidad de aportar mejoras y soluciones a un problema en concreto o a una situación y la facilidad para cuantificar los potenciales de diferentes opciones de futuro, permitiendo actuar con rigor científico.

Este trabajo pretende buscar un cambio de rumbo hacia un futuro más sostenible para las estaciones de esquí.

La necesidad de adoptar tendencias que tengan como objetivo conseguir un equilibrio sostenible surge de las evidencias que confirman el fenómeno denominado “Cambio Climático”. Si bien se trata de una manifestación de una serie de consecuencias negativas a escala global, hay que entender que también tiene afecciones a escala puntual. Esto significa que influirnos de alguna forma sí o sí. El turismo hibernar en estaciones de esquí no iba a ser menos y en este trabajo se ha tratado de tener en cuenta aspectos tan importantes como el aumento de temperatura en la superficie terrestre y los problemas derivados de él, cómo son la necesidad de producir nieve, la adaptación a este problema que pueda darse por parte de los esquiadores y la necesidad de generar electricidad a partir de fuentes limpias y renovables.

El proceso desarrollado durante este trabajo ha dado como resultado la Tabla 6.1, una clasificación de los escenarios en función de lo favorables que sean:

CLASIFICACIÓN DE ESCENARIOS (de más favorable, a menos favorable)		Variación consumo % (respecto al Referencia)	Variación emisiones % (respecto al Referencia)
1º	D: No adaptación, 2°C Eficiente	-22,83%	-49,30%
2º	H: No adaptación, 4°C Eficiente	-22,63%	-49,07%
3º	F: Adaptación, 4°C Eficiente	-16,23%	-41,86%
4º	B: Adaptación, 2°C Eficiente	-14,51%	-39,92%
5º	C: No adaptación, 2°C Ineficiente	-8,32%	-9,38%
6º	G: No adaptación, 4°C Ineficiente	-8,12%	-9,15%
7º	E: Adaptación, 4°C Ineficiente	-1,72%	-1,94%
8º	A (Referencia): Adaptación, 2°C Ineficiente	-	-

Tabla 6.1: Clasificación de resultados

Esta clasificación permite identificar cuáles son los aspectos clave que determinan la favorabilidad de cada escenario.

6.1. Factores clave

Las medidas de eficiencia energética junto con la introducción de energías renovables son el factor más determinante. Como se puede apreciar en la Tabla 6.1, los cuatro escenarios favorables tienen medidas de eficiencia y energías renovables. Como se ha podido verificar en el apartado 4, la tendencia de los escenarios eficientes es mucho más propicia en cuanto a sostenibilidad se refiere, tanto en demanda energética como en emisiones y en generación. Se puede deducir que las emisiones de CO₂ están directamente relacionadas con la demanda, con la generación y transformación. Por lo tanto, es evidente que se trata de un sistema energético complejo pero las conclusiones pueden extraerse de manera simplificada, facilitando la comprensión de la problemática.

Por otro lado, el aumento de temperatura, a pesar de lo que pudiera parecer a priori, no es tan significativo para este caso de estudio. Esto se debe a las características que tiene la estación de Baqueira como la altitud, latitud, longitud y vertiente atlántica que hacen de sí una estación confiable y resiliente. A pesar de ello, la producción de nieve es necesaria para asegurar la duración de la temporada de esquí y por tanto, los ingresos. No hay que olvidar que se trata de una estación privada que tiene como objetivo conseguir beneficios y ganancias al final del ejercicio.

La variación de esquiadores que visitan la estación es también un factor importante. Sin embargo, no afectará siempre de una determinada manera puesto que en algunos casos se mantendrá constante (2°C No adaptación), en otros aumentará en mayor (2°C Adaptación) o menor (4°C Adaptación) medida y en otros disminuirá (4°C No adaptación).

A pesar de lo anteriormente comentado, hay que recordar que el resultado final es fruto de una combinación de todos los factores clave, si bien es cierto que unos influyen en mayor medida que otros.

6.2. Futuro del modelo LEAP-Baqueira

Uno de los aspectos importantes del modelo LEAP-Baqueira es precisamente su capacidad de adaptación a las exigencias y necesidades de modelización en el largo plazo. Esto significa que puede ser una herramienta muy útil y que puede amoldarse a diversos cambios y estudios. Desde la caracterización más desagregada de la demanda como en las cafeterías, pasando por el parque vehicular, el parque de pisado o llegando a introducir nuevos remontes, el modelo LEAP-Baqueira puede acondicionarse de manera fiable y consistente para estudiar estrategias o políticas de futuro, favoreciendo la toma de decisiones.

Además, si se pretende tener en cuenta las debilidades comentadas tanto en el apartado 5 como en el apartado 6, puede llevarse a cabo una ampliación o estudio más exhaustivo del presente trabajo. Entre las investigaciones posteriores destaca la posibilidad de estudiar otras medidas de eficiencia energética o la introducción de otro tipo de energías renovables, como podrían ser la minihidráulica o las calderas de biomasa.

Por último, cabe destacar la necesidad de estudiar un aspecto clave como son los costes. En este estudio no se ha entrado en detalle, sin embargo para cualquier proyecto ingenieril es muy importante analizar los costes así como la viabilidad económica de dicho proyecto.

7. Bibliografía

- Ahmadi S, Bevrani H, Jannaty H (2012) A fuzzy inference model for short-term load forecasting. *Renew Energy Distrib Gener (ICREDG)*, 2012 Second Iran Conf 39–44
- Amelung B, Nicholls S, Viner D (2007) Implications of global climate change for tourism flows and seasonality. *J Travel Res* 45:285–296. doi: 10.1177/0047287506295937
- Bajracharya I, Bhattarai N (2016) Road Transportation Energy Demand and Environmental Emission: A Case of Kathmandu Valley. 30–40
- Bazán Navarrete G, Ortiz Muñiz G (2010) Modelos de planeación energética. In: *Energía a debate*. <https://www.energiaadebate.com/blog/1962/>. Accessed 21 May 2018
- Beniston M (2003) Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Clim Change*. doi: https://doi-org.recursos.biblioteca.upc.edu/10.1007/978-94-015-1252-7_2
- Canyurt OE, Ozturk HK (2008) Application of genetic algorithm (GA) technique on demand estimation of fossil fuels in Turkey. *Energy Policy* 36:2562–2569. doi: 10.1016/j.enpol.2008.03.010
- Carbajo Molina A (2016) Climate Change in the Spanish Ski Resorts
- Contreras R, Mateo A (2006) Mantenimiento de parques eólicos. *Potencia*
- Dickson M, Dickson ME (2006) Investigating skier demand for environmentally sustainable ski hill management research project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of In the School of Report No: 4 12
- Domaines esquiables de France (2011) Recueil d'indicateurs et analyses 2011. L'Observatoire
- Ekonomou L (2010) Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks. *Energy* 35:512–517. doi: 10.1016/j.energy.2009.10.018
- El Kenawy A, López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM (2012) Trend and variability of surface air temperature in northeastern Spain (1920–2006): Linkage to atmospheric circulation. *Atmos Res* 106:159–180. doi: 10.1016/j.atmosres.2011.12.006
- European Commission Photovoltaic Geographical Information System
- Gracia Amillo, A.M.; Huld, T. Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces. Validation of the model implemented in PVGIS. JRC Technical Report EUR 26075 EN, JRC81902, ISBN 978-92-79-32507-6, ISSN 1831-9424, doi:10.2790/91554 2013.
- Huang Y, Bor YJ, Peng CY (2011) The long-term forecast of Taiwan's energy supply and demand: LEAP model application. *Energy Policy* 39:6790–6803. doi: 10.1016/j.enpol.2010.10.023
- Huld, T.; Müller, R., Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa *Solar Energy* 2012, 86, 1803–1815.
- IPCC (2001) Cambio climático 2001: Informe de síntesis / Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Cambio Climático 2001 Inf síntesis 3–92. doi: 10.1256/004316502320517344
- Kumar A, Bhattacharya SC, Pham HL (2003) Greenhouse gas mitigation potential of biomass energy technologies in Vietnam using the long range energy alternative planning system

- model. *Energy* 28:627–654. doi: 10.1016/S0360-5442(02)00157-3
- López Palomeque F (1996) Turismo de invierno y estaciones de esquí en el Pirineo catalán. *Investig geográficas* 19–40
- Manzini F (2006) Inserting renewable fuels and technologies for transport in Mexico City Metropolitan Area. *Int J Hydrogen Energy* 31:327–335. doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.06.024
- Margarit i Roset J (2011) Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio técnico PER 2011-2020. Idae 200. doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2
- Martínez-Jaramillo JE, Arango-Aramburo S, Álvarez-Urbe KC, Jaramillo-Álvarez P (2017) Assessing the impacts of transport policies through energy system simulation: The case of the Medellín Metropolitan Area, Colombia. *Energy Policy* 101:101–108. doi: 10.1016/j.enpol.2016.11.026
- Ministerio de Industria Energía y Turismo (2015) Planificación Energética. Plan de Desarrollo de la Red de Transporte de Energía Eléctrica 2015-2020. 549
- Monsolar Calculadora separación entre paneles solares para evitar sombras. <https://www.monsolar.com/separacion-paneles-solares>
- Muñoz Jiménez A (2014) Modelos de predicción a corto plazo de la generación eléctrica en instalaciones fotovoltaicas. 286
- Müller, R.; Behrendt, T.; Hammer, A.; Kemper, A. A new algorithm for the satellite-based retrieval of solar surface irradiance in spectral bands. *Remote Sens.* 2012, 4, 622–647.
- Müller, R.; Matsoukas, C.; Gratzki, A.; Behr, H.; Hollmann, R. The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance—A LUT based eigenvector hybrid approach. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, 1012–1024.
- NSAA (2006) Small Resort's Guide to Energy. 22
- Oficina Catalana del Canvi Climàtic (2018) Nota informativa sobre la metodología de estimación del mix eléctrico por parte de la oficina catalana del cambio climático. 0–1
- Pato R (2018) Sierra de Béjar- La Covatilla. In: *Energías Renov.* <https://www.energias-renovables.com/panorama/las-estaciones-de-esqui-podrian-ser-energeticamente-20180313>
- Pereiro Olaizola E (2016) Diagnóstico ambiental municipal de Vielha e Mijaran
- Pons M, López-Moreno JI, Rosas-Casals M, Jover (2015) The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Clim Change* 131:591–605. doi: 10.1007/s10584-015-1400-8
- Pons Pons M (2014) Climate change impacts on winter tourism in the Pyrenees and adaptation strategies
- Pulido LS, Ramón ND, Fransi EC (2016) Sostenibilidad económica y situación financiera de las estaciones de esquí alpino del Pirineo catalán. *Intang Cap* 12:1451–1483. doi: 10.3926/ic.823
- R. Hoyal (2013) Pocket: The World's Most Eco-Friendly Ski Resorts. In: skitheworld.com. <https://getpocket.com/a/read/2103558917>. Accessed 7 Mar 2018
- REN21 (2018) Advancing the global renewable energy transition. Highlights REN21 Renewables 2018 Glob Status Rep Perspect 52 pgs.

- Sathaye JA, Dixon RK, Rosenzweig C (1997) Climate change country studies. *Appl Energy* 56:225–235. doi: 10.1016/S0306-2619(97)0007X-4
- Serrano E (2005) Glaciares, permafrost y cambio climático. 20–26
- SotySolar Mantenimiento y garantías de los paneles solares fotovoltaicos
- Steiger R, Mayer M (2008) Snowmaking and Climate Change. *Mt Res Dev* 28:292–298. doi: 10.1659/mrd.0978
- Suganthi L, Samuel AA (2012) Energy models for demand forecasting - A review. *Renew Sustain Energy Rev* 16:1223–1240. doi: 10.1016/j.rser.2011.08.014
- Travesset-Baro O (2017) Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista. TDX (Tesis Dr en Xarxa)
- Travesset-Baro O, Rosas-Casals M, Jover E (2015) Transport energy consumption in mountainous roads. A comparative case study for internal combustion engines and electric vehicles in Andorra. *Transp Res Part D-Transport Environ* 34:16–26. doi: 10.1016/j.trd.2014.09.006
- Varro L (2015) Projected Costs of Generating Electricity 2015. doi: 10.1787/cost_electricity-2015-en